Dudi Indrajit

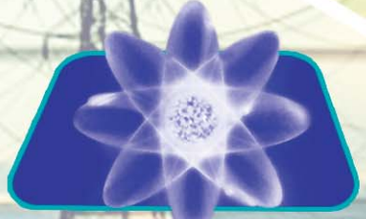
Mudah dan Aktif Belajar Fisika

untuk Kelas XII
Sekolah Menengah Atas/Madrasah Aliyah
Program Ilmu Pengetahuan Alam

3

PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional





Dudi Indrajit
Mudah dan Aktif Belajar Fisika
untuk Kelas XII SMA/MA Program Ilmu Pengetahuan Alam

Dudi Indrajit

Disertai Pengayaan • Indonesia-Inggris

Mudah dan Aktif Belajar Fisika

3

PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Hak Cipta Pada Departemen Pendidikan Nasional
dilindungi oleh Undang-Undang

Mudah dan Aktif Belajar Fisika
untuk Kelas XII Sekolah Menengah Atas/Madrasah Aliyah
Program Ilmu Pengetahuan Alam

Penulis : Dudi Indrajit
Penyunting : Ahmad Saripudin
Pewajah Isi : Neni Yuliati
Ilustrator : S. Riyadi
Pewajah Sampul : A. Purnama

Ukuran Buku : 21 x 29,7cm

530.07
DUD DUDI Indrajit
m Mudah dan Aktif Belajar Fisika 3 :untuk Kelas XII Sekolah Menengah Atas / Madrasah Aliyah Program Ilmu Pengetahuan Alam / penulis, Dudi Indrajit, ; penyunting, Ahmad Saripudin, ; illustrator, S. Riyadi. — Jakarta : Pusat Perbukuan, Departemen Pendidikan Nasional, 2009.
vi, 306 hlm, : ilus. ; 30 cm

Bibliografi : hlm. 306
Indeks
ISBN 978-979-068-816-2 (No. Jil Lengkap)
ISBN 978-979-068-931-2

1. Fisika-Studi dan Pengajaran I. Judul
II. Ahmad Saripudin III. S. Riyadi

Hak Cipta Buku ini dibeli oleh Departemen Pendidikan Nasional
dari Penerbit Setia Purna Inves, PT

Diterbitkan oleh Pusat Perbukuan
Departemen Pendidikan Nasional
Tahun 2009

Diperbanyak oleh

Kata Pengantar

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT, berkat rahmat dan karunia-Nya, Pemerintah, dalam hal ini, Departemen Pendidikan Nasional, pada tahun 2009, telah membeli hak cipta buku teks pelajaran ini dari penulis/penerbit untuk disebarluaskan kepada masyarakat melalui situs internet (*website*) Jaringan Pendidikan Nasional.

Buku teks pelajaran ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan dan telah ditetapkan sebagai buku teks pelajaran yang memenuhi syarat kelayakan untuk digunakan dalam proses pembelajaran melalui Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 22 Tahun 2007 tanggal 25 Juni 2007.

Kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para penulis/penerbit yang telah berkenan mengalihkan hak cipta karyanya kepada Departemen Pendidikan Nasional untuk digunakan secara luas oleh para siswa dan guru di seluruh Indonesia.

Buku-buku teks pelajaran yang telah dialihkan hak ciptanya kepada Departemen Pendidikan Nasional ini, dapat diunduh (*down load*), digandakan, dicetak, dialihmediakan, atau difotokopi oleh masyarakat. Namun, untuk penggandaan yang bersifat komersial harga penjualannya harus memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh Pemerintah. Diharapkan bahwa buku teks pelajaran ini akan lebih mudah diakses sehingga siswa dan guru di seluruh Indonesia maupun sekolah Indonesia yang berada di luar negeri dapat memanfaatkan sumber belajar ini.

Kami berharap, semua pihak dapat mendukung kebijakan ini. Kepada para siswa kami ucapkan selamat belajar dan manfaatkanlah buku ini sebaik-baiknya. Kami menyadari bahwa buku ini masih perlu ditingkatkan mutunya. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat kami harapkan.

Jakarta, Juni 2009
Kepala Pusat Perbukuan

Kata Pengantar

Fisika adalah salah satu rumpun ilmu sains yang mempelajari alam semesta. Ruang lingkup ilmu Fisika sangat luas, mulai dari atom yang berdimensi nanometer hingga jagat raya yang berdimensi tahunan cahaya. Dalam kehidupan sehari-hari, banyak ditemukan aplikasi ilmu Fisika, baik berupa fenomena-fenomena di alam atau rekayasa teknologi. Oleh karena itu, Fisika memiliki tingkat urgensitas yang tinggi karena merupakan dasar untuk penguasaan teknologi di masa depan.

Sesuai dengan misi penerbit untuk memberikan kontribusi yang nyata bagi kemajuan ilmu pengetahuan maka penulis dan penerbit merealisasikan tanggung jawab tersebut dengan menyediakan buku bahan ajar Fisika yang berkualitas, sesuai dengan tuntutan kurikulum yang berlaku saat ini.

Buku ini disusun dengan mengutamakan pendekatan secara inkuiri (eksperimen) dan disajikan secara sistematis, komunikatif, dan integratif, serta adanya keruntutan rangkaian (bab dengan subbab, antarsubbab dalam bab, antaralenia dalam subbab). Sebelum mempelajari materi, sebaiknya Anda terlebih dahulu membaca bagian ***Advanced Organizer*** yang terdapat pada halaman awal setiap bab agar Anda dapat mengetahui isi bab secara umum. Pada awal setiap bab, disajikan pula **Tes Kompetensi Awal** sebagai evaluasi materi prasyarat untuk mempelajari bab yang bersangkutan.

Di akhir setiap bab, terdapat **Rangkuman**, **Peta Konsep**, dan **Refleksi** yang bertujuan lebih meningkatkan pemahaman Anda tentang materi yang telah dipelajari dengan memunculkan umpan balik untuk evaluasi diri. Buku ini dilengkapi juga dengan beberapa materi, tugas, dan soal pengayaan, di antaranya **Informasi untuk Anda** (***Information for You***), **Tantangan untuk Anda**, **Mari Mencari Tahu**, **Tugas Anda**, **Pembahasan Soal**, dan **Tokoh** yang dapat memperluas pengetahuan materi Fisika yang sedang dipelajari.

Untuk menguji pemahaman Anda terhadap materi yang telah dipelajari diberikan **Tes Kompentensi Subbab** pada setiap akhir subbab, **Tes Kompetensi Bab** pada setiap akhir bab, dan **Tes Kompetensi Fisika Semester** pada setiap akhir semester**.** Selain itu, pada akhir buku juga diberikan **Tes Kompetensi Akhir** untuk menguji pemahaman materi Fisika selama satu tahun ajaran. Semua tes kompetensi tersebut merupakan sarana mengevaluasi pemahaman dan melatih kemampuan menerapkan konsep/prinsip Fisika yang berkaitan dengan materi yang telah dipelajari. Adapun **Kunci Jawaban** (nomor ganjil) kami sajikan untuk memudahkan Anda dalam mengevaluasi hasil jawaban.

Untuk menumbuhkan daya kreativitas, kemampuan psikomotorik, dan cara berpikir ilmiah, kami sajikan **Aktivitas Fisika** dan **Proyek Semester** yang menuntut peran aktif Anda dalam melakukan kegiatan tersebut.

Demikianlah persembahan kami untuk dunia pendidikan.

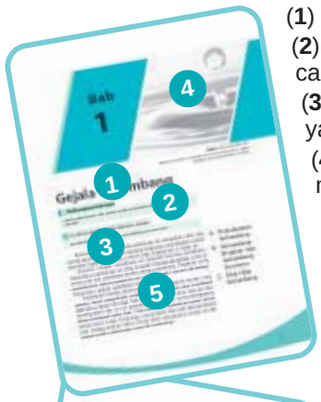
Bandung, Mei 2007

Penerbit

Panduan untuk Pembaca

Materi-materi pembelajaran pada buku ini berdasarkan kurikulum yang berlaku saat ini dan disajikan secara sistematis, komunikatif, dan integratif. Di setiap awal bab, dilengkapi gambar pembuka pelajaran, bertujuan memberikan gambaran materi pembelajaran yang akan dibahas, dan mengajarkan siswa konsep berpikir kontekstual sekaligus merangsang cara berpikir kontekstual. Selain itu, buku ini juga ditata dengan format yang menarik dan didukung dengan foto dan ilustrasi yang representatif. Penggunaan bahasa yang sederhana, sesuai dengan tingkatan kognitif siswa sehingga membuat pembaca lebih mudah memahaminya.

Buku Fisika untuk SMA Kelas XII ini terdiri atas sepuluh bab, yaitu Gejala Gelombang, Gelombang Cahaya, Gelombang Bunyi, Medan Listrik, Potensial Listrik, dan Kapasitor, Medan Magnetik, Induksi Elektromagnetik, Radiasi Benda Hitam, Fisika Atom, Teori Relativitas Khusus, serta Fisika Inti dan Radioaktivitas. Untuk lebih jelasnya, perhatikan petunjuk untuk pembaca berikut.



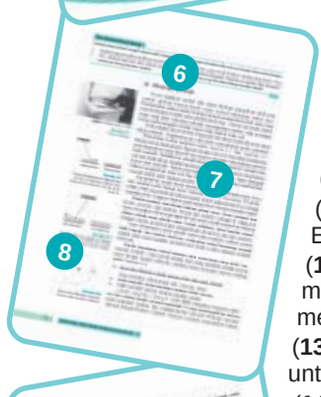
(**1**) **Judul Bab**, disesuaikan dengan tema materi dalam bab.

(**2**) **Hasil yang harus Anda capai**, tujuan umum yang harus Anda capai pada bab yang Anda pelajari.

(**3**) **Setelah mempelajari bab ini**, **Anda harus mampu**, kemampuan yang harus Anda kuasai setelah mempelajari bab.

(**4**) **Gambar Pembuka Bab**, disajikan untuk mengetahui contoh manfaat dari materi yang akan dipelajari.

(**5**) **Advanced Organizer**, uraian singkat tentang isi bab untuk menumbuhkan motivasi belajar dan mengarahkan Anda agar lebih fokus terhadap isi bab.

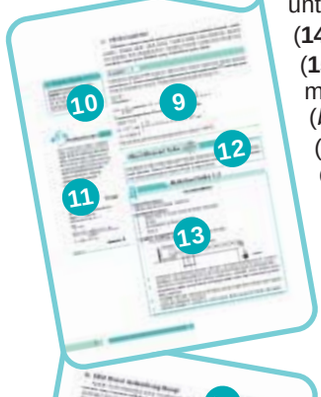


(**6**) **Tes Kompetensi Awal,** merupakan soal prasyarat yang harus Anda pahami sebelum memasuki materi pembelajaran.

(**7**) **Materi Pembelajaran**, disajikan secara sistematis, komunikatif, integratif, dan sesuai dengan perkembangan ilmu dan teknologi terkini (*up to date*).

(**8**) **Gambar** dan **Ilustrasi**, sesuai dengan materi dalam bab yang disajikan secara proporsional dan harmonis.

(**9**) **Contoh Soal**, berisi contoh dan penyelesaian soal.



(**10**) **Tugas Anda**, berisi tugas atau latihan soal yang berkaitan dengan materi tersebut.

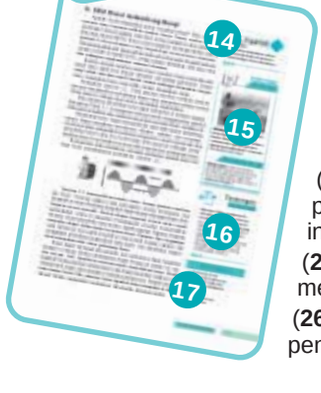
(**11**) **Pembahasan Soal**, berisi contoh soal yang berasal dari Ebtanas, UAN, UMPTN, atau SPMB.

(**12**) **Mari Mencari Tahu**, tugas mencari informasi yang bertujuan menumbuhkan rasa ingin tahu dan mendorong siswa untuk mencari informasi lebih jauh.

(**13**) **Aktivitas Fisika**, kegiatan yang dilakukan secara berkelompok untuk mengembangkan kecakapan hidup Anda.

(**14**) **Ingatlah**, catatan atau hal-hal penting yang perlu Anda ketahui.

(**15**) **Informasi untuk Anda (*Information for You*)**, berisi pengayaan mengenai informasi dan aplikasi materi, disajikan dalam 2 bahasa (*bilingual*).



(**16**) **Tantangan untuk Anda**, berisi soal-soal yang disajikan dengan tingkat kesulitan lebih tinggi.

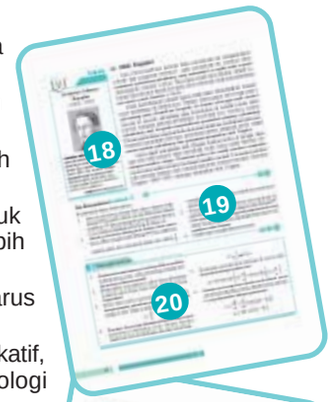
(**17**) **Kata Kunci**

(**18**) **Tokoh**, berisi tokoh Fisika penggagas ide baru dan pekerja keras sehingga akan menumbuhkan semangat inovatif/kreatif, etos kerja, dan mengembangkan kecakapan hidup Anda.

(**19**) **Tes Kompetensi Subbab**, berisi soal-soal untuk mengevaluasi penguasaan materi subbab.

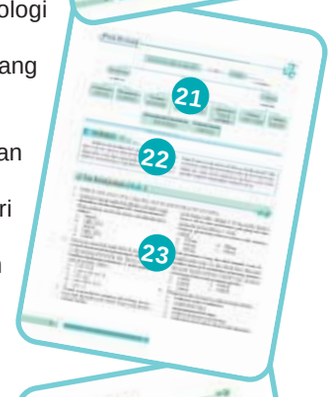
(**20**) **Rangkuman**

(**21**) **Peta Konsep**



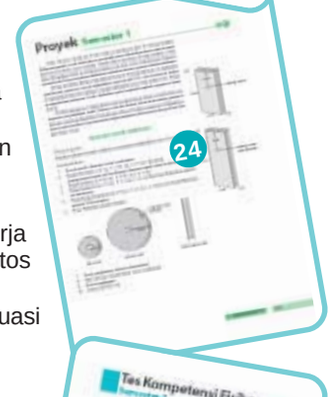
(**22**) **Refleksi**, sebagai umpan balik bagi siswa setelah mempelajari materi di akhir pembelajaran tiap bab.

(**23**) **Tes Kompetensi Bab**, berisi soal-soal untuk mengevaluasi penguasaan materi bab.

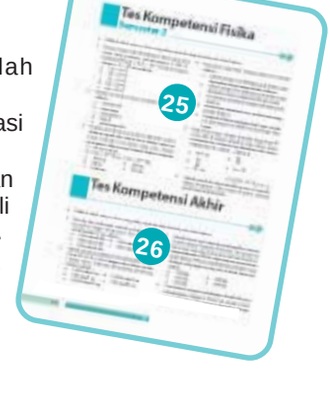


(**24**) **Proyek Semester**, kegiatan percobaan untuk meningkatkan pemahaman konsep Fisika dan memotivasi Anda untuk menggali informasi, memanfaatkan informasi, dan menyelesaikan masalah.

(**25**) **Tes Kompetensi Fisika Semester**, berisi soal-soal untuk mengevaluasi penguasaan materi selama satu semester.



(**26**) **Tes Kompetensi Akhir**, berisi soal-soal untuk mengevaluasi penguasaan materi selama satu tahun ajaran.



Diunduh dari BSE.Mahoni.com

Daftar Isi

Kata Sambutan • iii
Kata Pengantar • iv
Panduan untuk Pembaca • v

Bab 1
Gejala Gelombang • 1

A. Pemahaman Gelombang • 2
B. Gelombang Berjalan dan Gelombang Stasioner • 7
C. Sifat-Sifat Gelombang • 19
Rangkuman • 26
Peta Konsep • 27
Refleksi • 27
Tes Kompetensi Bab 1 • 28

Bab 2
Gelombang Cahaya • 31

A. Interferensi Cahaya • 32
B. Difraksi Cahaya • 37
C. Polarisasi Cahaya • 42
Rangkuman • 46
Peta Konsep • 46
Refleksi • 46
Tes Kompetensi Bab 2 • 47

Bab 3
Gelombang Bunyi • 49

A. Sifat Dasar Gelombang Bunyi • 50
B. Cepat Rambat Bunyi • 51
C. Unsur Bunyi dan Pemanfaatan Gelombang Bunyi • 53
D. Sifat-Sifat Gelombang Bunyi • 55
E. Dawai dan Pipa Organa sebagai Sumber Bunyi • 58
F. Energi Gelombang Bunyi • 66
Rangkuman • 70
Peta Konsep • 71
Refleksi • 71
Tes Kompetensi Bab 3 • 72

Bab 4
Medan Listrik, Potensial Listrik, dan Kapasitor • 75

A. Muatan Listrik • 76
B. Medan Listrik • 80
C. Energi Potensial Listrik dan Potensial Listrik • 87
D. Kapasitor • 92
Rangkuman • 100
Peta Konsep • 101
Refleksi • 101
Tes Kompetensi Bab 4 • 102

Bab 5
Medan Magnetik • 105

A. Medan Magnetik • 106
B. Gaya Magnetik • 114
C. Aplikasi Gaya Magnetik • 120
D. Sifat Magnet Bahan • 122
Rangkuman • 124
Peta Konsep • 125
Refleksi • 125
Tes Kompetensi Bab 5 • 126

Bab 6
Induksi Elektromagnetik • 131
A. Gejala Induksi Elektromagnetik • 132
B. Aplikasi Induksi Elektromagnetik Faraday • 142
C. Arus dan Tegangan Listrik Bolak-Balik • 147
Rangkuman • 165
Peta Konsep • 166
Refleksi • 166
Tes Kompetensi Bab 6 • 167
Proyek Semester 1 • 169
Tes Kompetensi Fisika Semester 1 • 171

Bab 7
Radiasi Benda Hitam • 175
A. Pengertian Radiasi Benda Hitam • 176
B. Dualisme Gelombang Partikel • 183
Rangkuman • 192
Peta Konsep • 193
Refleksi • 193
Tes Kompetensi Bab 7 • 194

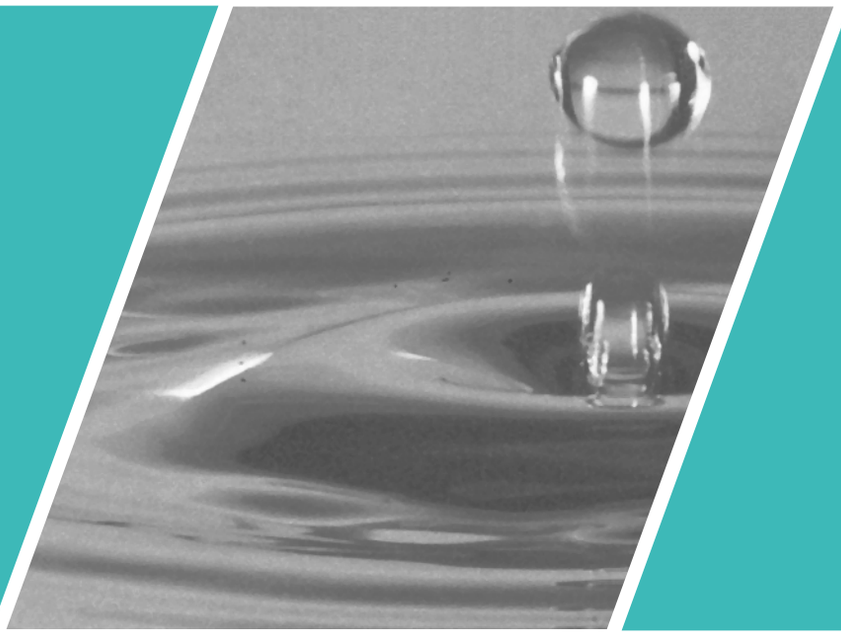
Bab 8
Fisika Atom • 197
A. Evolusi Model Atom • 198
B. Atom Berelektron Banyak • 210
Rangkuman • 224
Peta Konsep • 225
Refleksi • 225
Tes Kompetensi Bab 8 • 226

Bab 9
Teori Relativitas Khusus • 229
A. Semua Gerak Bersifat Relatif • 230
B. Teori Relativitas Einstein • 235
Rangkuman • 252
Peta Konsep • 253
Refleksi • 253
Tes Kompetensi Bab 9 • 254

Bab 10
Fisika Inti dan Radioaktivitas • 257
A. Inti Atom • 258
B. Radioaktivitas • 264
C. Reaksi Inti • 272
D. Reaktor Nuklir, Bom Nuklir, dan Radioisotop • 277
Rangkuman • 283
Peta Konsep • 284
Refleksi • 284
Tes Kompetensi Bab 10 • 285
Proyek Semester 2 • 287
Tes Kompetensi Fisika Semester 2 • 288

Tes Kompetensi Akhir • 291
Kunci Jawaban • 295
Apendiks • 300
Senarai • 303
Indeks • 304
Daftar Pustaka • 306

Bab 1



Sumber: *Science Encyclopedia*, 2001

Riak pada air kolam terjadi karena perambatan getaran akibat jatuhnya batu pada air kolam tersebut.

Gejala Gelombang

Hasil yang harus Anda capai:

menerapkan konsep dan prinsip gejala gelombang dalam menyelesaikan masalah.

Setelah mempelajari bab ini, Anda harus mampu:

mendeskripsikan gejala dan ciri-ciri gelombang secara umum.

Susunan riak melingkar pada permukaan air merupakan salah satu bentuk gelombang. Pola ombak berbentuk lingkaran yang terlihat semakin menyebar dapat terjadi ketika sebuah batu dijatuhkan ke dalam air.

Sepintas, tampak permukaan air bergerak bersama gelombang. Sebenarnya, permukaan air tidak bergerak bersama gelombang. Jarak di antara riak-riak gelombang disebut panjang gelombang. Dapatkah Anda membuktikan bahwa permukaan air tidak bergerak bersama gelombang? Sebenarnya, apakah gelombang itu?

Pemahaman tentang gejala-gejala gelombang menjadi sesuatu yang penting untuk mempelajari gelombang tingkat lanjut serta memahami aplikasinya dalam teknologi. Nah, pada bab ini Anda akan mencari tahu tentang gejala dan ciri-ciri gelombang secara umum, serta penerapannya dalam kehidupan sehari-hari. Oleh karena itu, perhatikan materi bab ini dengan benar, kelak Anda akan merasa takjub oleh sifat-sifat gelombang yang mengisyaratkan bahwa Tuhan telah menciptakan segala sesuatu dengan penuh perhitungan yang tak tertandingi.

A. Pemahaman Gelombang

B. Gelombang Berjalan dan Gelombang Stasioner

C. Sifat-Sifat Gelombang

Tes Kompetensi Awal

Sebelum mempelajari konsep Gejala Gelombang, kerjakanlah soal-soal berikut dalam buku latihan.

1. Apakah yang dimaksud dengan gelombang?
2. Bagaimanakah sifat-sifat dari gelombang?
3. Sebutkan jenis-jenis gelombang yang Anda ketahui?
4. Gelombang apakah yang terbentuk pada air kolam ketika Anda menjatuhkan batu ke dalamnya?



Tokoh

Frank Oppenheimer
(1912–1985)



Frank Oppenheimer lahir di New York pada tahun 1912. Di *Exploratorium* dia mendemonstrasikan pengamatannya bahwa gerakan pendulum bila diproyeksikan pada sabuk kertas bergerak membentuk lintasan grafik sinusoidal.

Sumber: *Conceptual Physics*, 1998

A. Pemahaman Gelombang

Sebenarnya, banyak kejadian di sekitar Anda yang erat kaitannya dengan gelombang. Sebagai contoh, pernahkah Anda berpikir mengapa bunyi dari sumber bunyi dapat didengar? Umumnya orang akan menjawab "Tentu saja kita dapat mendengar karena memiliki telinga". Padahal sebetulnya terdengarnya bunyi bukan hanya disebabkan oleh adanya telinga, tetapi juga disebabkan oleh adanya sumber bunyi dan medium perambatan. Ketika Anda mendengar pembicaraan seseorang, telinga Anda telah menerima gelombang bunyi yang merambat di udara sebagai medium perambatannya.

Berdasarkan sumbernya, gelombang dikelompokkan menjadi dua macam, yaitu *gelombang mekanik* dan *gelombang elektromagnetik*. Gelombang mekanik berasal dari osilasi (getaran) suatu titik atau partikel di dalam suatu ruang. Energi dan momentum getaran dirambatkan melalui gangguan di dalam medium tempat terjadinya getaran tersebut tanpa perpindahan materi. Sebagai contoh, ketika biola dipetik atau digesek, gangguan terhadap tali dijalarkan sepanjang tali. Pada saat yang bersamaan, tali yang bergetar menghasilkan sedikit perubahan pada tekanan udara di sekitarnya, dan perubahan pada tekanan ini dijalarkan sebagai gelombang bunyi melalui udara.

Gelombang elektromagnetik berasal dari osilasi muatan-muatan listrik di dalam atom atau molekul. Pada gelombang elektromagnetik, energi dan momentum dibawa oleh medan listrik dan magnet yang dapat menjalar melalui medium vakum. Cahaya merupakan gelombang elektromagnetik karena dapat menjalar tanpa adanya medium perantara.

Berdasarkan arah getar dan rambatannya, gelombang dibedakan menjadi *gelombang transversal* dan *gelombang longitudinal*. Untuk mengetahui kedua bentuk gelombang tersebut, lakukanlah kegiatan berikut.



Aktivitas Fisika 1.1

Jenis Gelombang Berdasarkan Arah Getarannya

Tujuan Percobaan

Mengamati gelombang transversal dan gelombang longitudinal.

Alat-Alat Percobaan

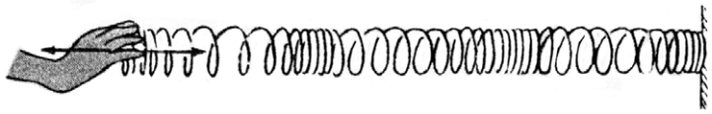
Sebuah slinki (pegas plastik) yang panjangnya 3 meter.

Langkah-Langkah Percobaan

1. Pegang kuat-kuat salah satu ujung slinki oleh teman Anda atau diikatkan pada tiang.
2. Rentangkan sesuai panjangnya dan getarkan ujung yang satu dengan satu kali hentakan naik turun dari posisi setimbang dan kembali ke posisi setimbang (posisi saat tangan Anda diam).
3. Ulangi langkah 2, dan getarkan ujung slinki tersebut terus menerus naik turun, kemudian amati perambatan gelombang sepanjang slinki.



4. Letakkan slinki di atas lantai licin, kemudian dengan bantuan teman Anda pegang salah satu ujungnya.
5. Hentakkan salah satu ujung pegas dengan satu kali dorongan dan satu kali tarikan ke posisi semula. Amati rapatan dan regangan yang merambat sepanjang slinki.



6. Ulangi langkah 5, namun dorongan dan tarikannya dilakukan secara terus-menerus. Amati perambatan dan regangan sepanjang slinki.

Dari percobaan tersebut, diperoleh kesimpulan seperti ditunjukkan dalam tabel berikut.

Tabel 1.1
Perbedaan Gelombang Transversal dan Gelombang Longitudinal

	Hasil Pengamatan Gelombang Transversal dan Longitudinal pada Slinki	
	Pulsa Transversal	**Pulsa Longitudinal**
Bentuk Gelombang		
Arah getaran	Tegak lurus dengan arah rambatan gelombang	Searah dengan arah rambatan gelombang
Panjang Gelombang	Merupakan jarak antara puncak ke puncak gelombang berikutnya	Merupakan jarak antara rapatan ke rapatan berikutnya, atau renggangan ke renggangan berikutnya

Gelombang transversal adalah gelombang yang arah getarannya tegak lurus terhadap arah rambatannya, contohnya gelombang permukaan air, gelombang pada tali, dan gelombang cahaya. Gelombang longitudinal adalah gelombang yang arah getarnya sejajar dengan arah rambatannya, contohnya gelombang bunyi, dan gelombang pada pegas.

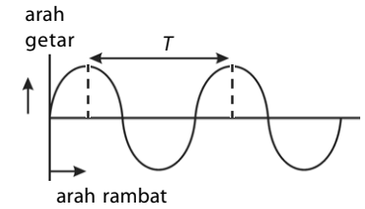
Gelombang pada pegas atau slinki dapat menggambarkan bentuk gelombang transversal dan gelombang longitudinal, bergantung bagaimana cara pegas tersebut digetarkan. Jika pegas diberi usikan tegak lurus terhadap panjangnya, akan terbentuk gelombang transversal. Adapun jika pegas diberi gaya searah dengan panjang pegas, pada pegas akan terjadi rapatan dan renggangan yang disebut gelombang longitudinal.

Buatlah model gelombang dengan menggunakan seutas tali yang salah satu ujungnya diikatkan pada tiang. Kemudian, gerakkan tangan Anda naik turun sehingga akan terlihat bagaimana sebuah gelombang merambat, seperti pada **Gambar 1.2**. Menurut Anda, apakah tali ikut merambat ketika digetarkan?

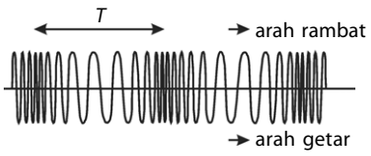
Dalam perambatannya, gelombang memindahkan energi dan tidak menyertakan perambatan mediumnya. Pada kasus gelombang tali, gerakan tangan naik turun membangkitkan energi mekanik pada tali. Energi mekanik tersebut menggetarkan daerah di sekitarnya sehingga daerah di sekitarnya ikut pula bergerak naik turun, demikian seterusnya sampai ujung tali.

Tugas Anda 1.1

Selain dalam medium slinki, dapatkah Anda mencari medium lain untuk menggambarkan gelombang longitudinal?



(a)

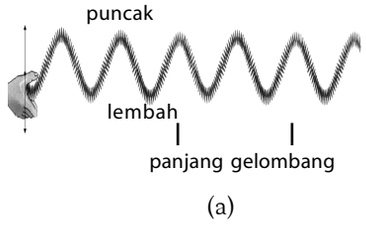


(b)

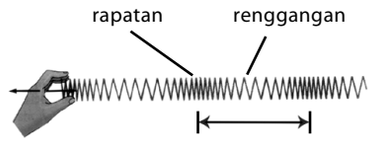
Gambar 1.1
Berdasarkan arah getarnya, gelombang mekanik dikelompokkan menjadi:
(a) Gelombang transversal;
(b) Gelombang logitudinal.



Gambar 1.2
Gelombang pada tali.



(a)



(b)

Gambar 1.3
(a) Panjang gelombang pada gelombang transversal.
(b) Panjang gelombang pada gelombang longitudinal.

1. Panjang, Frekuensi, Periode, dan Cepat Rambat Gelombang

Definisi satu gelombang pada gelombang transversal adalah jarak yang sama dengan jarak antara dua puncak berurutan atau dua lembah berurutan. Jarak tersebut dinamakan panjang gelombang (λ), seperti ditunjukkan pada **Gambar 1.3(a)**.

Pada gelombang longitudinal, panjang gelombang (λ) didefinisikan sebagai jarak yang sama dengan jarak antara dua pusat renggangan yang berdekatan atau jarak antara dua pusat rapatan yang berdekatan, seperti pada **Gambar 1.3(b)**.

Jarak yang ditempuh gelombang setiap satu satuan waktu dinamakan cepat rambat gelombang (v), sedangkan banyaknya gelombang yang terbentuk setiap satu satuan waktu dinamakan frekuensi (f).

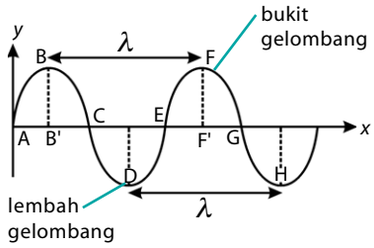
Periode (T) adalah waktu yang diperlukan untuk menempuh jarak satu panjang gelombang.

2. Persamaan Umum Gelombang

Besaran-besaran apa yang dimiliki sebuah gelombang? Anda pasti masih ingat bahwa setiap gelombang memiliki frekuensi (f), periode (T), dan cepat rambat gelombang (v). Hubungan antara besaran-besaran tersebut secara matematis dituliskan sebagai berikut.

$$v = \frac{\lambda}{T} \text{ atau } v = f\lambda \qquad (1\text{–}1)$$

Keterangan:
v = cepat rambat gelombang (m/s)
λ = panjang gelombang (m)
$T = \frac{1}{f}$ = periode gelombang (s)
f = frekuensi gelombang (Hz)



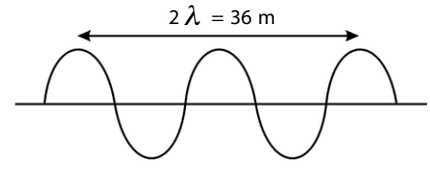
Gambar 1.4
Panjang gelombang (λ) pada grafik simpangan (y) terhadap arah rambat (x).

Perhatikan **Gambar 1.4**. Gambar tersebut merupakan proyeksi dari simpangan (y) dan perpindahan (x) dari sebuah gelombang. Bentuknya menyerupai bentuk gelombang transversal terdiri dari bukit dan lembah.

Berdasarkan gambar tersebut, panjang gelombang adalah jarak dari B ke F atau jarak dari D ke H. Amplitudo (A) adalah nilai simpangan terbesar yang dapat dicapai partikel medium, yaitu jarak dari B ke B' atau dari F ke F'). Puncak gelombang adalah titik tertinggi pada gelombang, yaitu titik B dan titik F. Dasar gelombang adalah cekungan atau lembah terendah, yaitu titik D dan titik H. Adapun simpul adalah titik-titik pada gelombang ketika mencapai kesetimbangan atau simpangannya nol.

Contoh 1.1

Gelombang pada tali merambat dengan kecepatan 6 m/s. Jika jarak antara 3 puncak gelombang yang berurutan adalah 36 meter, tentukan:
a. panjang gelombang;
b. frekuensi gelombang tersebut.



Jawab:
Diketahui:
v = 6 m/s;
Jarak antara 3 puncak = 36 m.

a. $2\lambda = 36$

$\lambda = 18$

Jadi, panjang gelombang tali 18 m.

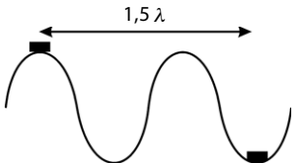
b. $v = \lambda f$

$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{6}{18} = \frac{1}{3}$ Hz

Jadi, frekuensi gelombang tali adalah $\frac{1}{3}$ Hz.

Contoh 1.2

Di permukaan sungai, terdapat dua buah gabus yang terpisah sejauh 90 cm. Keduanya naik turun terbawa gelombang air. Salah satu gabus berada di puncak gelombang, sedangkan gabus yang lain berada di dasar gelombang. Di antara kedua gabus tersebut, terdapat satu bukit. Jika frekuensi gelombang air tersebut adalah 3 Hz, tentukan cepat rambat gelombang pada air.



Jawab:

Diketahui: $f = 3$ Hz

Dengan memerhatikan gambar, diperoleh

$1{,}5\lambda = 90$ cm

$\lambda = 60$ cm

$v = \lambda f = 60 \text{ cm} \times 3 \text{ Hz}$

$= 180$ cm/s

$= 1{,}8$ m/s

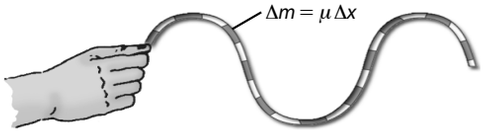
Jadi, cepat rambat gelombang pada air adalah 1,8 m/s.

3. Energi Gelombang

Di awal bab ini, Anda telah mengetahui bahwa gelombang dihasilkan oleh getaran yang dirambatkan. Untuk menghitung energi gelombang, Anda harus mengingat kembali materi di Kelas XI tentang energi total massa yang berosilasi pada pegas. Energi tersebut dituliskan sebagai berikut.

$$E = \frac{1}{2}kA^2$$

dengan $k = m\omega^2$ sebagai konstanta gaya dan A adalah amplitudo. Selanjutnya, perhatikan gambar berikut.



Gambar 1.5
Gerakan tangan dirambatkan oleh tali dalam bentuk gelombang.

Gambar 1.5 merupakan sebuah model gelombang tali. Gelombang tali tersebut terjadi karena adanya gerakan tangan. Tangan tersebut bergerak harmonik dengan amplitudo A dan frekuensi sudut ω. Gerakan tangan ini menyebabkan setiap elemen tali mengalami gerak harmonik. Δm adalah massa dari segmen kecil tali, μ merupakan rapat massa linear tali, dan Δx merupakan panjang segmen tali. Dengan demikian, energi gelombang dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\Delta E = \frac{1}{2}kA^2$$

$$\Delta E = \frac{1}{2}\Delta m\,\omega^2 A^2$$

Pembahasan Soal

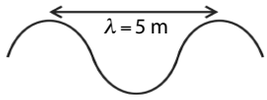
Gelombang air laut menyebabkan permukaan air naik turun dengan periode 2 s. Jika jarak antara dua puncak gelombang 5 m, gelombang akan mencapai jarak 10 m dalam waktu

a. 1 s
b. 2 s
c. 3 s
d. 4 s
e. 5 s

UMPTN 2001

Pembahasan:

$T = 2$ s



jarak antara dua puncak = satu gelombang

$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{5 \text{ m}}{2 \text{ s}} = 2{,}5$ m/s

$s = vt$

$10 \text{ m} = (2{,}5 \text{ m/s})t$

$t = \frac{10 \text{ m}}{2{,}5 \text{ m/s}} = 4$ s

Jawaban: d

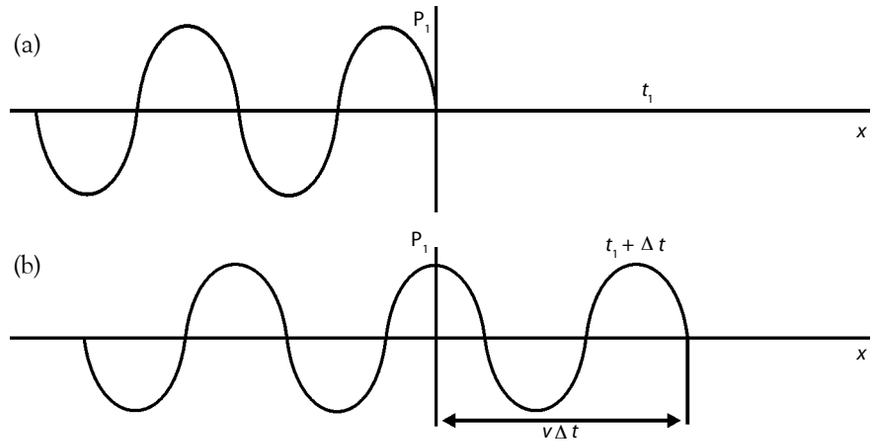
Tugas Anda 1.2

Embusan angin kencang membuat *Sears Building* di Chicago goyang dan selanjutnya bergetar dengan frekuensi sebesar 0,1 Hz. Berapa periode getarannya?

$$\Delta E = \frac{1}{2}\mu \Delta x\, \omega^2 A^2$$

$$\boxed{\Delta E = \frac{1}{2}\mu \omega^2 A^2 \Delta x} \qquad (1\text{–}2)$$

Selanjutnya, perhatikan **Gambar 1.6** berikut.



Gambar 1.6
(a) Pada waktu t_1, gelombang tali mencapai titik P_1 dan memiliki energi karena gerak harmonik elemen-elemennya.
(b) Pada saat waktu bertambah sebesar Δt, gelombang tali menjalar sejauh $v\,\Delta t$.

Gambar 1.6 memperlihatkan sebuah gelombang yang menjalar ke kanan. Pada saat t_1, gelombang tepat mencapai titik P_1. Setiap segmen tali pada bagian kiri P_1 memiliki energi ΔE yang diberikan oleh **Persamaan (1–2)**. Setelah Δt , gelombang telah menjalar sejauh $x = v\,\Delta t$, seperti terlihat pada **Gambar 1.6 (b)**. Energi yang ditransmisikan melalui P_1 selama Δt adalah

$$\Delta E = \frac{1}{2}\mu \omega^2 A^2 \Delta x$$

$$\boxed{\Delta E = \frac{1}{2}\mu \omega^2 A^2 v \Delta t} \qquad (1\text{–}3)$$

Selanjutnya, jumlah energi yang ditransmisikan setiap satuan waktu disebut laju energi atau sama dengan daya yang ditransmisikan. Secara matematis ditulis sebagai berikut.

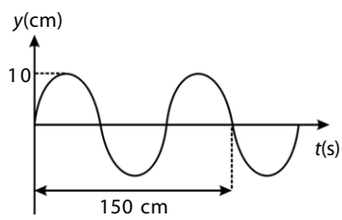
$$\boxed{P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2}\mu \omega^2 A^2 v} \qquad (1\text{–}4)$$

Dari **Persamaan (1–4)** Anda dapat melihat bahwa daya yang ditransmisikan berbanding lurus dengan kuadrat amplitudo, kuadrat frekuensi, dan laju gelombang.



Tantangan untuk Anda

Grafik simpangan terhadap waktu sebuah gelombang yang memiliki kecepatan 0,05 m/s seperti pada gambar berikut.



Berdasarkan gambar tersebut, tentukan:
a. amplitudo (*A*);
b. periode (*T*);
c. frekuensi gelombang (*f*).

Contoh 1.3

Sebuah gelombang panjangnya 35 cm dan amplitudonya 1,2 cm bergerak dengan kecepatan 47,4 m/s di sepanjang tali yang panjangnya 15 m dan massanya 80 g.
a. Berapakah energi total gelombang pada tali?
b. Berapakah daya yang dirambatkan tali tersebut?

Jawab:

Diketahui: $\lambda = 35$ cm; $L = 15$ m;
$A = 1{,}2$ cm; $m = 80$ gram.
$v = 47{,}4$ m/s;

Rapat massa linear tali adalah

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{0{,}08\,\text{kg}}{15\,\text{m}} = 5{,}33 \times 10^{-3}\ \text{kg/m}$$

Frekuensi sudut gelombang adalah

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{f}{\lambda} = 2\pi \frac{47{,}4\ \text{m/s}}{0{,}35\ \text{m}} = 851\ \text{rad/s}$$

a. Energi total gelombang pada tali adalah

$$\Delta E = \frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \Delta x$$

$$= \frac{1}{2}(5{,}33 \times 10^{-3}\ \text{kg/m})\ (851\ \text{rad/s})^2\ (0{,}012\ \text{m})^2\ (15\ \text{m}) = 4{,}17\ \text{J}$$

b. Daya yang ditransmisikan melalui sebuah titik pada tali adalah

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 v$$

$$= \frac{1}{2}(5{,}33 \times 10^{-3}\ \text{kg/m})(851\ \text{rad/s})^2(0{,}012\ \text{m})^2(47{,}4\ \text{m/s}) = 13{,}2\ \text{W}$$

Kata Kunci

- gelombang mekanik
- gelombang elektromagnetik
- gelombang transversal
- gelombang longitudinal
- panjang gelombang
- periode gelombang
- frekuensi gelombang
- simpul
- laju energi gelombang
- daya gelombang
- cepat rambat gelombang
- rapat massa linear
- energi total gelombang

Tes Kompetensi Subbab A

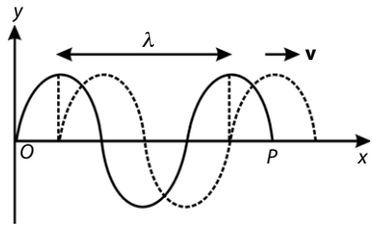
Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Jelaskan jenis-jenis gelombang berdasarkan sumber dan arah getarnya.
2. Gelombang air laut bergerak dengan kecepatan 15 m/s. Jarak antara tiga puncak gelombang yang berdekatan adalah 6 m. Tentukan:
 a. panjang gelombang;
 b. periode;
 c. frekuensi gelombang.
3. Berikan dua alasan mengapa gelombang air laut amplitudonya semakin kecil jika semakin jauh dari sumber gelombang.
4. Dua buah gabus berjarak 12 m. Kedua gabus tersebut berada di atas permukaan air. Kedua gabus bergerak naik turun bersamaan dengan penjalaran gelombang air. Satu gabus berada di atas bukit gelombang dan satu lagi berada di lembah gelombang. Di antara kedua gabus tersebut, terdapat sebuah bukit gelombang. Jika cepat rambat gelombang 20 m/s, tentukan frekuensi gelombang tersebut.
5. Sebuah gelombang merambatkan energi sebesar 0,5 J dengan frekuensi 500 Hz dan amplitudo 2 cm.
 a. Hitunglah pengurangan energi, jika frekuensinya tetap dan amplitudonya berubah menjadi 3 cm.
 b. Hitunglah energi gelombang tersebut, jika frekuensi dan amplitudonya menjadi $\frac{1}{2}$ kali dari semula.
6. Suatu gelombang transversal yang memiliki frekuensi 20 kHz menggetarkan partikel bermassa 10 mg dengan amplitudo 5 mm. Jika $\pi^2 \approx 10$, hitunglah besar energi getar yang dimiliki oleh sumber getar gelombang tersebut.

B. Gelombang Berjalan dan Gelombang Stasioner

Masih ingatkah Anda cara membuat gelombang transversal menggunakan tali? Salah satu ujung tali yang terletak di atas lantai dihentakkan turun naik sehingga pada tali tersebut terjadi gelombang yang ditandai dengan terbentuknya bukit dan lembah yang menjalar sepanjang tali. Jika tangan Anda mampu menggerakkan ujung tali turun naik secara konstan, selama gerakan tersebut akan terbentuk gelombang yang menjalar sepanjang tali. Bagaimana bentuk gelombang tersebut? Jika Anda perhatikan, gelombang tersebut memiliki amplitudo tetap. Gelombang seperti ini disebut gelombang berjalan.

1. Gelombang Berjalan



Gambar 1.7
Gelombang merambat ke arah sumbu-*x* positif.

Seutas tali panjang digetarkan sehingga pada tali merambat gelombang transversal ke arah sumbu-*x* positif, seperti terlihat pada **Gambar 1.7**. Gelombang berjalan yang dihasilkan dimulai dari titik O, yaitu titik asal rambatan gelombang. Saat titik O telah bergetar *t* sekon, simpangan getar titik O terhadap waktu gelombang memenuhi persamaan simpangan getar harmonis. Secara matematis, persamaannya dituliskan sebagai berikut.

$$y = A \sin \omega t \qquad (1\text{–}5)$$

Keterangan:
y = simpangan gelombang (m)
A = amplitudo gelombang (m)
ω = kecepatan sudut (rad/s)
t = waktu (s)

Oleh karena $\omega = \frac{2\pi}{T}$ dan $\theta = \frac{2\pi}{T}t$, **Persamaan (1–5)** dapat juga ditulis:

$$y = A \sin \frac{2\pi}{T}t \text{ atau } y = A \sin \theta \qquad (1\text{–}6)$$

Gelombang merambat mulai dari titik O ke sumbu-*x* positif menuju titik P yang berjarak *x* dari titik O. Waktu yang diperlukan gelombang untuk merambat dari titik O ke titik P sejauh *x* adalah $\frac{x}{v}$ sekon. Jika titik O bergetar selama *t* sekon maka titik *P* akan bergetar selama $(t - \frac{x}{v})$ sekon. Persamaan simpangan gelombang di titik P adalah

$$y_p = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \qquad (1\text{–}7)$$

Persamaan (1–7) berlaku untuk gelombang yang merambat ke arah sumbu-*x* positif. Adapun persamaan gelombang yang merambat dari sumbu-*x* positif menuju sumbu-*x* negatif atau pusat koordinat adalah

$$y_p = A \sin \omega \left(t + \frac{x}{v} \right) \qquad (1\text{–}8)$$

Pada **Persamaan (1–7)** dan **Persamaan (1–8)** amplitudo A berharga positif karena dianggap awal getaran dimulai dari titik setimbang O bergerak ke atas. Jika gerakan dimulai dari titik setimbang O bergerak ke bawah maka amplitudo A berharga negatif sehingga persamaan simpangan gelombang di P secara umum menjadi

$$y_p = \pm A \sin \omega \left(t \pm \frac{x}{v} \right) \qquad (1\text{–}9)$$

Dalam bentuk lain **Persamaan (1–9)** dapat ditulis sebagai berikut.

$$y_p = \pm A \sin \left(\omega\, t \pm k\, x \right) \qquad (1\text{–}10)$$

dengan k adalah nilai dari $\frac{\omega}{v}$ atau $\frac{2\pi}{\lambda}$.

Ingatlah

$y = \pm A \sin(\omega t \pm kx)$
$+A$ = awal getaran gelombang ke atas
$-A$ = awal getaran gelombang ke bawah
$+k$ = gelombang merambat ke kiri
$-k$ = gelombang merambat ke kanan

Keterangan:
y_p = simpangan gelombang (m)
ω = kecepatan sudut getaran (rad/s)
x = posisi titik P diukur dari titik asal O (m)
k = bilangan gelombang
A = amplitudo (m)
t = waktu titik asal bergetar (s)
f = frekuensi getaran/gelombang (Hz)

a. Sudut Fase, Fase, dan Beda Fase

Anda telah mengetahui bahwa gelombang berjalan memiliki persamaan simpangan seperti pada **Persamaan (1–10)**. Untuk keadaan umum, persamaannya sebagai berikut.

$$y_p = A\sin(\omega t - kx) = A\sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$$

Dari persamaan tersebut, besar sudut fasenya adalah

$$\theta_p = 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \qquad (1–11)$$

dan besar fasenya adalah

$$\varphi_p = \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \qquad (1–12)$$

sehingga hubungan antara sudut fase dan fase gelombangnya dapat ditulis sebagai berikut.

$$\theta_p = 2\pi\ \varphi_p \qquad (1–13)$$

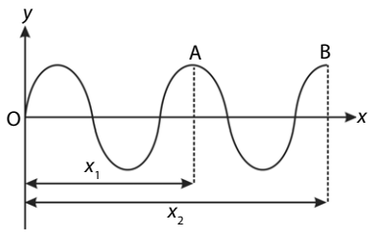
Perhatikan **Gambar 1.8**. Titik A yang berjarak x_1 dari titik asal getaran O telah bergetar selama t sekon memiliki fase φ_1. Pada awal getaran yang sama, titik B berjarak x_2 dari titik asal getaran O dan memiliki fase φ_2. Beda fase titik A dan B adalah

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right) - \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda}\right)$$

$$\Delta\varphi = \frac{x_2 - x_1}{\lambda} = \frac{\Delta x}{\lambda} \qquad (1–14)$$

Tugas Anda 1.3

Gelombang air laut merupakan gelombang berjalan. Energi gelombang air laut ini dapat digunakan untuk menggerakkan generator listrik. Bukan hal yang mustahil teknologi ini suatu saat diterapkan di Indonesia. Menurut Anda, kira-kira di daerah laut manakah teknologi ini dapat diterapkan? Coba Anda diskusikan alasannya bersama teman-teman.



Gambar 1.8
Titik *A* yang berjarak x_1 dan titik *B* yang berjarak x_2 dari O. Kedua titik memiliki beda fase $\Delta\varphi$.

Mari Mencari Tahu



Masih ingatkah Anda tentang bencana alam paling dahsyat yang menimpa saudara-saudara kita di Aceh dan sekitarnya pada 26 Desember 2004? **Gelombang Tsunami** meluluh-lantakkan bumi Aceh. Tugas Anda, carilah informasi mengenai gelombang tsunami tersebut, seperti bagaimana terjadinya, apa penyebab-penyebabnya, kapan dan di mana pernah terjadi Tsunami, dan informasi lainnya tentang tsunami. Agar lebih menarik, tambahkan gambar-gambar yang relevan ke dalam tulisan Anda.



Informasi untuk Anda

Satuan frekuensi adalah **hertz** (Hz), diambil dari nama **Heinrich Hertz**, orang yang pertama kali mendemonstrasikan gelombang radio pada 1886. Satu getaran per sekon disebut 1 hertz; dua getaran per sekon dinamakan 2 hertz, dan selanjutnya.

Information for You

*The unit of frequency is called the **hertz** (Hz), after **Heinrich Hertz**, who demonstrated radio in 1886. One vibration per second is 1 hertz; two vibrations per second is 2 hertz, and so on.*

Contoh 1.4

Persamaan sebuah gelombang berjalan dinyatakan oleh $y = 0{,}4 \sin 0{,}6\pi\ (20t - 0{,}5x)$ dengan x dan y dalam cm dan t dalam sekon, tentukan:

a. arah perambatan gelombang;
b. amplitudo gelombang;
c. frekuensi gelombang;
d. bilangan gelombang;
e. cepat rambat gelombang.

Jawab:

Persamaan simpangan $y = 0{,}4 \sin 0{,}6\pi\,(20t - 0{,}5x)$ dapat disamakan dengan persamaan $y = A \sin(\omega t - kx)$.

$y = 0{,}4 \sin 0{,}6\pi\,(20t - 0{,}5x) = 0{,}4 \sin\,(12\pi t - 0{,}3\pi x)$

Dengan memerhatikan kedua persamaan tersebut, semua pertanyaan akan terjawab.

a. Tanda dalam fungsi sinus negatif, arah perambatan gelombang ke kanan.
b. Amplitudo $A = 0{,}4$ cm.
c. $\omega = 12\pi$, kecepatan sudut $\omega = 2\pi f$ maka
 $2\pi f = 12\pi \rightarrow f = 6$ Hz
d. $k = 0{,}3\pi$, dari **Persamaan (1–11)** $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$, panjang gelombang diperoleh:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \rightarrow 0{,}3\pi = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{2}{0{,}3} = \frac{20}{3}\text{ cm}$$

e. Cepat rambat gelombang dapat diperoleh dari **Persamaan (1–1)**, yaitu

$$v = \lambda f = \left(\frac{2}{0{,}3}\text{cm}\right)(6\text{ Hz}) = 40\text{ cm/s}.$$

Contoh 1.5

Sebuah gelombang merambat ke arah sumbu-x positif dengan kelajuan 8 m/s, frekuensi 16 Hz, dan amplitudo getar 2 cm. Gelombang tersebut melalui titik P yang berjarak 10 m dari titik O. Jika titik asal telah bergetar selama 4/3 sekon dan titik O kali pertama bergetar dengan arah simpangan ke bawah, tentukanlah

a. persamaan simpangan gelombang dalam bentuk sinus;
b. persamaan getaran di titik P;
c. sudut fase dan fase gelombang;
d. simpangan di titik P.

Jawab:

Diketahui:

$v = 8$ cm/s;
$f = 16$ Hz;
$A = 2$ cm;
$t = 4/3$ sekon.

a. Persamaan simpangan gelombang berjalan dalam bentuk sinus dengan titik O ($x = 0$) saat $t = 0$ bergerak ke bawah dan arah rambatnya ke sumbu-x positif adalah

$$y = -A \sin(2\pi ft - kx) = -A \sin 2\pi f\left(t - \frac{x}{v}\right)$$

$$y = -0{,}02 \sin 32\pi\left(t - \frac{x}{8}\right)$$

b. $y_p = -0{,}02 \sin 32\pi\left(t - \frac{10}{8}\right)$

$$y_p = -0{,}02 \sin(32\pi t - 40\pi)$$



Tantangan untuk Anda

Sebuah gelombang merambat dari sumber S ke kanan dengan laju 8 m/s, frekuensi 16 Hz, dan amplitudo 4 cm. Gelombang tersebut melalui titik P yang berjarak $9\frac{1}{2}$ m dari S. Jika S telah bergetar $1\frac{1}{4}$ S dan arah gerak pertamanya ke atas, hitunglah simpangan titik P pada saat itu.

c. Persamaan umum simpangan adalah

$$y = -0{,}02 \sin 32\pi \left(t - \frac{x}{8} \right)$$

Sudut fase, $\theta = 32\pi \left(t - \frac{x}{8} \right) = 32\pi \left(\frac{4}{3} - \frac{10}{8} \right) = \frac{8}{3}\pi \text{ rad}$

Fase, $\varphi = \frac{\theta}{2\pi} = \frac{\frac{8\pi}{3}}{2\pi} = \frac{4}{3}$

d. Simpangan di titik P yang berjarak 10 m dari O adalah

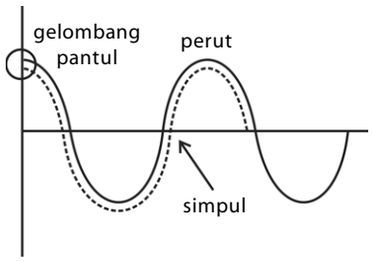
$$y_p = -A \sin \theta_p = -0{,}02 \sin \frac{8}{3}\pi = -0{,}02 \sin 120° = -0{,}01\sqrt{3} \text{ m}$$

(Tanda negatif menunjukkan arah simpangan ke bawah)

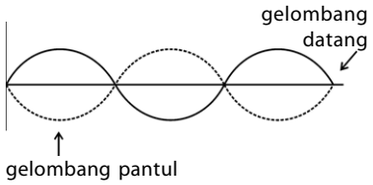
2. Gelombang Stasioner

Gelombang stasioner dapat terjadi karena *dua buah gelombang yang saling superposisi*. Misalnya, superposisi terus-menerus antara gelombang datang dan gelombang pantul yang merambat pada gelombang tali.

Pada gelombang stasioner, terdapat titik-titik yang bergetar dengan amplitudo maksimum. Titik ini dinamakan perut gelombang, sedangkan titik-titik yang bergetar dengan amplitudo minimum disebut simpul gelombang. Gelombang stasioner dapat dihasilkan dari seutas tali, baik dengan ujung tidak terikat (**Gambar 1.9**) maupun dengan ujung terikat (**Gambar 1.10**).



Gambar 1.9
Gelombang pantul dari seutas tali yang bergerak bebas (tidak ada perubahan fase).



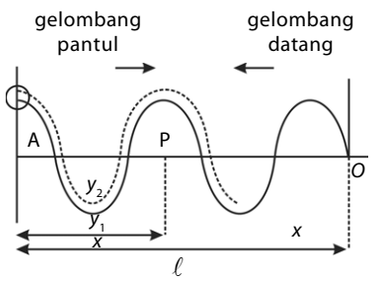
Gambar 1.10
Gelombang pantul dari seutas tali yang terikat.

a. Gelombang Stasioner pada Tali dengan Ujung Bebas

Gelombang stasioner pada tali dengan ujung bebas, ujung tali dibiarkan bergerak naik-turun, sedangkan ujung yang lain digetarkan. Pada gelombang stasioner ini tidak terjadi perubahan fase, artinya fase gelombang datang sama dengan fase gelombang pantul.

Perhatikan **Gambar 1.11**. Titik O adalah titik asal rambatan gelombang datang dengan ℓ = panjang tali dan x = jarak titik P dari ujung bebas A. Titik P mengalami perpaduan gelombang datang y_1 dengan gelombang pantul y_2. Secara matematis, simpangan gelombang datang y_1 di titik P adalah

$$y_1 = A \sin \omega \left(t - \frac{\ell - x}{v} \right) \qquad (1\text{–}15)$$



Gambar 1.11
Simpangan gelombang datang y_1 dan simpangan gelombang pantul y_2 pada ujung bebas tidak mengalami beda fase.

Waktu yang diperlukan gelombang datang dari titik O sampai di titik P adalah $\frac{\ell - x}{v}$, sedangkan waktu yang diperlukan oleh gelombang pantul dari titik O ke titik A sampai di P adalah $\frac{\ell + x}{v}$. Jadi, persamaan simpangan gelombang pantul adalah

$$y_2 = A \sin \omega \left(t - \frac{\ell + x}{v} \right) \qquad (1\text{–}16)$$

Hasil perpaduan simpangan gelombang datang y_1 dan simpangan gelombang pantul y_2 di titik P dapat ditulis sebagai berikut.

$$y_p = y_1 + y_2$$

$$y_p = A \sin \omega\left(t - \frac{\ell - x}{v}\right) + A \sin \omega\left(t - \frac{\ell + x}{v}\right)$$

misalkan $\alpha = \omega\left(t - \frac{\ell - x}{v}\right)$ dan $\beta = \omega\left(t - \frac{\ell + x}{v}\right)$

maka persamaan simpangan y_p menjadi

$$y_p = A\sin\alpha + A\sin\beta$$

berdasarkan aturan perjumlahan sinus, yaitu

$$\sin\alpha + \sin\beta = 2\sin\frac{1}{2}(\alpha + \beta)\cos\frac{1}{2}(\alpha - \beta)$$

sehingga

$$y_p = 2A\sin\frac{1}{2}\left[\omega\left(t - \frac{\ell - x}{v}\right) + \omega\left(t - \frac{\ell + x}{v}\right)\right]\cos\frac{1}{2}\left[\omega\left(t - \frac{\ell - x}{v}\right) - \omega\left(t - \frac{\ell + x}{v}\right)\right]$$

Oleh karena $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $vt = \lambda$, dan $f = \frac{1}{T}$, persamaan gelombang stasioner akibat pemantulan ujung bebas dapat dituliskan sebagai berikut.

$$y_p = 2A\sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{\ell}{\lambda}\right)\cos 2\pi\left(\frac{x}{\lambda}\right) \qquad (1\text{–}17)$$

Persamaan simpangan y_p dapat juga ditulis sebagai berikut.

$$y_p = 2A\cos 2\pi\left(\frac{x}{\lambda}\right)\sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{\ell}{\lambda}\right) \qquad (1\text{–}18)$$

Perhatikan **Persamaan (1–18)**. Persamaan $2A\cos 2\pi\left(\frac{x}{\lambda}\right)$ merupakan amplitudo gelombang stasioner di titik P. Jadi, amplitudo gelombang di titik P dapat dinyatakan dengan persamaan

$$A_p = 2A\cos 2\pi\left(\frac{x}{\lambda}\right) = 2A\cos kx \qquad (1\text{–}19)$$

Letak perut dan simpul dari ujung bebas dapat ditentukan berdasarkan **Persamaan (1–19)**.

Perut terjadi ketika terbentuk simpangan maksimum, syaratnya $\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) = \pm 1$ atau $\frac{2\pi}{\lambda}x = n\pi$, sehingga diperoleh

$$x = n\left(\frac{1}{2}\lambda\right) \text{ dengan } n = 0, 1, 2, \ldots \qquad (1\text{–}20)$$

Dengan demikian, perut terbentuk pada posisi $x = 0, \frac{1}{2}\lambda, \lambda, \frac{3}{2}\lambda, \ldots$.

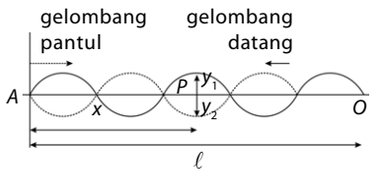
Simpul terjadi ketika terbentuk simpangan gelombang berharga nol, syaratnya $\cos\left(2\pi\frac{x}{\lambda}\right)=0$ atau $\frac{2\pi}{\lambda}x=(2n+1)\frac{\pi}{2}$, sehingga diperoleh:

$$x = (2n + 1)\frac{1}{4}\lambda \text{ dengan } n = 0, 1, 2, \ldots \qquad (1\text{–}21)$$

Dengan demikian, simpul terbentuk pada posisi $x = \frac{1}{4}\lambda, \frac{3}{4}\lambda, \frac{5}{4}\lambda, \ldots$ dari ujung bebas.

b. Gelombang Stasioner pada Tali dengan Ujung Terikat

Gelombang stasioner pada tali dengan ujung terikat diperoleh dari getaran seutas tali yang ujungnya terikat sehingga tidak dapat bergerak, seperti terlihat pada **Gambar 1.12**.



Gambar 1.12
Simpangan gelombang datang y_1 dan simpangan gelombang pantul y_2 pada ujung terikat memiliki beda fase 180°.

Oleh karena ujung tali tidak dapat bergerak maka akan terjadi perubahan fase gelombang datang dengan gelombang pantul sebesar π rad.

Penurunan persamaan simpangan gelombang stasioner pada ujung terikat dengan melihat **Gambar 1.12**. Titik O adalah titik awal rambatan gelombang datang dengan ℓ = panjang tali, x = jarak titik P yang merupakan perpaduan gelombang datang y_1 dan gelombang pantul y_2. Secara matematis, simpangan y yang terjadi pada titik P adalah simpangan gelombang datang y_1 di titik P.

$$y_1 = A\sin\omega\left(t-\frac{\ell-x}{v}\right) \qquad (1\text{–}22)$$

Waktu yang diperlukan gelombang datang dari titik O sampai titik P adalah $\frac{\ell-x}{v}$, sedangkan waktu yang diperlukan oleh gelombang pantul dari titik O ke A sampai di titik P adalah $\frac{\ell+x}{v}$. Gelombang stasioner pada tali dengan ujung terikat memiliki beda sudut fase antara gelombang datang dan gelombang pantul sebesar 180°. Dengan demikian, persamaan simpangan y_2 gelombang pantul adalah

$$y_2 = -A\sin\omega\left(t-\frac{\ell+x}{v}\right) \qquad (1\text{–}23)$$

Hasil perpaduan simpangan gelombang datang y_1 dan simpangan gelombang pantul y_2 di titik P dapat dinyatakan dengan persamaan

$$y_p = y_1 + y_2$$

$$y_p = A\sin\omega\left(t-\frac{\ell-x}{v}\right) - A\sin\omega\left(t-\frac{\ell+x}{v}\right)$$

Misalkan, $\alpha=\omega\left(t-\frac{\ell-x}{v}\right)$ dan $\beta=\omega\left(t-\frac{\ell+x}{v}\right)$

Tugas Anda 1.4

Rumus syarat terbentuknya simpul dan perut dapat juga ditulis seperti berikut.

$x = (2n - 1)\frac{1}{4}\lambda$ untuk simpul dan

$x = n\left(\frac{1}{2}\lambda\right)$ untuk perut.

Coba Anda diskusikan dengan teman, bagaimanakah penurunannya?

Dengan demikian, persamaan simpangan menjadi:

$$y_p = A\sin\alpha - A\sin\beta$$

$$y_p = 2A\sin\frac{1}{2}\left[\omega\left(t-\frac{\ell - x}{v}\right)-\omega\left(t-\frac{\ell + x}{v}\right)\right]\cos\frac{1}{2}\left[\omega\left(t-\frac{\ell - x}{v}\right)+\omega\left(t-\frac{\ell + x}{v}\right)\right]$$

$$y_p = 2A\sin\omega\left(\frac{x}{v}\right)\cos\omega\left(t-\frac{\ell}{v}\right)$$

Oleh karena $\omega\frac{2\pi}{T}$, $vT = \lambda$, dan $f = \frac{1}{T}$ maka

$$y_p = 2A\sin 2\pi\left(\frac{x}{\lambda}\right)\cos 2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{\ell}{\lambda}\right) \qquad (1\text{–}24)$$

Jika Anda perhatikan **Persamaan (1–24),** $2A\sin 2\pi\left(\frac{x}{\lambda}\right)$ merupakan amplitudo gelombang stasioner pada titik P. Dengan demikian, amplitudo gelombang di titik P dapat ditulis sebagai berikut.

$$A_p = 2A\sin 2\pi\left(\frac{x}{\lambda}\right) \qquad (1\text{–}25)$$

Letak perut dan simpul dapat ditentukan berdasarkan **Persamaan (1–25)**.

Perut terjadi ketika terbentuk simpangan maksimum, syaratnya $\sin 2\pi\frac{x}{\lambda} = \pm 1$ atau $2\pi\frac{x}{\lambda} = (2n+1)\frac{\pi}{2}$, sehingga diperoleh

$$x = (2n + 1)\frac{1}{4}\lambda, \text{ dengan } n = 0, 1, 2 \qquad (1\text{–}26)$$

Dengan demikian, perut terbentuk pada posisi $x = \frac{1}{4}\lambda, \frac{3}{4}\lambda, \frac{5}{4}\lambda, ...$ dari titik ujung tali terikat.



Tantangan untuk Anda

Gelombang stasioner dapat terjadi karena superposisi gelombang datang dan gelombang pantul oleh ujung bebas. Titik simpul yang kesepuluh berjarak 1,52 m dari ujung bebasnya. Jika frekuensi gelombang itu 50 Hz, berapakah cepat rambat gelombangnya?

Simpul terjadi ketika terbentuk simpangan gelombang bernilai nol, syaratnya $\sin 2\pi\frac{x}{\lambda} = 0$ atau $\frac{2\pi}{\lambda}x = n\pi$ sehingga diperoleh

$$x = n\left(\frac{1}{2}\lambda\right), \text{ dengan } n = 0, 1, 2, ... \qquad (1\text{–}27)$$

Dengan demikian, simpul terbentuk pada posisi $x = \frac{1}{2}\lambda, \lambda, \frac{3}{2}\lambda, ...$ dari titik ujung tali terikat.

Contoh 1.6

Seutas tali yang panjangnya 75 cm digetarkan naik-turun pada salah satu ujungnya, sedangkan ujung yang lain bergerak bebas.

a. Jika perut ke-5 berjarak 25 cm dari titik asal getaran, tentukan panjang gelombang yang terjadi.
b. Tentukan jarak simpul ke-3 dari titik asal getaran.

Jawab:

a. Oleh karena panjang tali $\ell = 75$ cm, sedangkan jarak perut ke-5 ($n = 4$) dari asal getaran 25 cm, jarak dari ujung bebas adalah $x = 75\text{ cm} - 25\text{ cm} = 50$ cm. Selanjutnya, gunakan **Persamaan (1–30)** untuk menentukan panjang gelombang (λ).

$$x = n\left(\frac{1}{2}\lambda\right) \Rightarrow 50 = 4\left(\frac{1}{2}\lambda\right) \text{ atau } \lambda = 25 \text{ cm}.$$

Jadi, panjang gelombangnya adalah 25 cm.

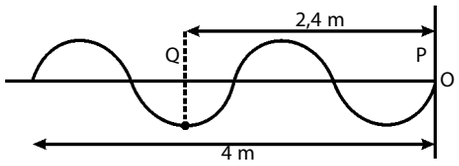
b. Jarak titik simpul ke-3 ($n = 2$) dari ujung bebas adalah

$$x = (2n + 1)\frac{1}{4}\lambda = (2\times 2 + 1)\frac{1}{4}(25\text{ cm}) = 31{,}25\text{ cm}$$

Jadi, jarak simpul ke-3 dari titik asal getaran adalah 75 cm – 31,25 cm = 43,75 cm.

Contoh 1.7

Seutas tali panjangnya 4 m, ujung P terikat, tali digetarkan transversal dengan frekuensi 10 Hz, amplitudo gelombang 6 cm, dan laju gelombang 12 m/s. Tentukan simpangan yang terjadi di titik Q yang berada 2,4 m dari titik asal getaran O setelah bergetar selama 2,5 sekon.



Jawab:

Diketahui:

$\ell = 4$ m; $d = 2{,}4$ m;
$v = 12$ m/s; $A = 6$ cm;
$f = 10$ Hz; $t = 2{,}5$ s.
$x = \ell - d$
$= 4 - 2{,}4 = 1{,}6$ m

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{12\text{ m/s}}{10\text{ Hz}} = 1{,}2\text{ m};\ T = \frac{1}{f} = \frac{1}{10\text{ Hz}} = 0{,}1\text{ s}$$

maka:

$$y_q = 2A\sin 2\pi\left(\frac{x}{\lambda}\right)\cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{\ell}{\lambda}\right)$$

$$= 2A\sin 360°\left(\frac{1{,}6}{1{,}2}\right)\cos 360°\left(\frac{2{,}5}{0{,}1} - \frac{4}{1{,}2}\right)$$

$$= 2 \times 6\text{ cm} \times 0{,}87(-0{,}5) = -5{,}22\text{ cm}$$

Jadi, simpangan yang terjadi di titik Q adalah –5,22 cm.

Kata Kunci

- bilangan gelombang
- amplitudo
- frekuensi
- kecepatan sudut getar
- sudut fase
- fase
- beda fase
- cepat rambat gelombang
- simpul gelombang
- perut gelombang

3. Kecepatan Gelombang Stasioner

Jika Anda membuat kembali model gelombang menggunakan tali yang salah satu ujungnya diikat, kemudian menggerakkannya terus-menerus sampai didapat dua buah gelombang. Gelombang pertama adalah gelombang yang bersumber pada tangan Anda dan gelombang kedua adalah gelombang yang berasal dari pemantulan. Pada keadaan tersebut, Anda akan menemukan kembali gejala superposisi.

Gelombang stasioner terbentuk jika gelombang pantul bersuperposisi dengan gelombang datang. Kedua gelombang tersebut memiliki frekuensi dan amplitudo sama, tetapi fasenya berlawanan. Untuk membuktikan adanya gelombang stasioner, lakukanlah percobaan seperti yang pernah dilakukan **Melde** pada **Aktivitas Fisika** berikut ini.

Aktivitas Fisika 1.2

Percobaan Melde

Tujuan Percobaan

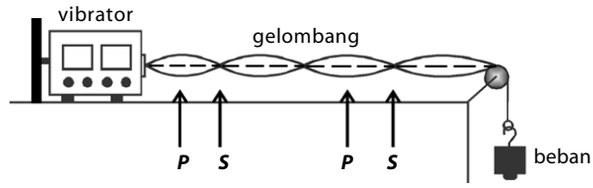
Mengamati gelombang stasioner.

Alat-Alat Percobaan

1. Kawat tipis (2 buah) yang berbeda massanya
2. Beban
3. Pembangkit getaran (vibrator)
4. Katrol

Langkah-Langkah Percobaan

1. Susunlah alat-alat seperti pada gambar berikut.



2. Hidupkan pembangkit getaran dengan menghubungkannya ke sumber tegangan sehingga pada tali terbentuk gelombang seperti pada gambar.
3. Jika belum terbentuk gelombang stasioner, ubahlah berat beban yang tergantung pada ujung katrol sehingga pada suatu saat terbentuk gelombang stasioner.
4. Amatilah dengan saksama gelombang yang terjadi dan tulislah kesimpulan Anda dari kegiatan tersebut.
5. Lakukan langkah 1 sampai 4 untuk kawat kedua yang berbeda massanya.

Coba sekarang Anda bandingkan kesimpulan Anda dengan kesimpulan **Melde** berikut.

Cepat rambat gelombang transversal yang merambat melalui senar pada percobaan **Melde**, sebanding dengan akar gaya tegangan kawat dan berbanding terbalik dengan akar massa kawat per satuan panjang kawat. Secara matematis persamaan cepat rambat gelombang dituliskan sebagai berikut.

$$v = \sqrt{\frac{Fl}{m}} \quad \text{atau} \quad v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \qquad (1\text{–}28)$$

Pembahasan Soal

Tali yang panjangnya 5 m bertegangan 2 N digetarkan sehingga terbentuk gelombang stasioner. Jika massa tali 625×10^{-3} kg, maka cepat rambat gelombang tali adalah

a. 2 m/s
b. 5 m/s
c. 6 m/s
d. 10 m/s
e. 40 m/s

UMPTN 1996

Pembahasan:

Diketahui:
$\ell = 5$ m; $F = 2$ N; $m = 625 \times 10^{-3}$ kg.
Menurut Melde kecepatan rambat gelombang tali adalah

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

$$= \sqrt{\frac{F\ell}{m}}$$

$$= \sqrt{\frac{2\text{ N}\ 5\text{ m}}{6{,}25 \cdot 10^{-3}\text{ kg}}}$$

$$= 40 \text{ m/s}$$

Jawaban: e

Keterangan:
v = cepat rambat gelombang (m/s)
F = gaya tegangan kawat (N)
$\mu = \frac{m}{l}$ = massa kawat per satuan panjang (kg/m)

Contoh 1.9

Seutas tali digetarkan sehingga membentuk gelombang yang berfrekuensi 20 Hz dan cepat rambat gelombang 4 m/s. Tentukan tempat kedudukan perut dan simpul dari ujung pemantulan gelombang tersebut.

Jawab:
Diketahui:
f = 20 Hz;
v = 4 m/s;

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{4 \text{ m/s}}{20 \text{ Hz}} = 0{,}2 \text{ m} = 20 \text{ cm}.$$

a. Kedudukan perut (p)

$$p = (2n+1)\ \frac{1}{4}\lambda = (2n+1)\left(\frac{1}{4} \times 20\right)$$

Untuk
$n = 1 \rightarrow p = 15$ cm
$n = 2 \rightarrow p = 25$ cm
$n = 3 \rightarrow p = 35$ cm
Jadi, kedudukan perut (p) untuk $n = 1$ berada pada jarak 15 cm, $n = 2$ berada pada jarak 25 cm, dan untuk $n = 3$ berada pada jarak 35 cm dari ujung pemantulan.

b. Kedudukan simpul (s)

$$s = n\left(\frac{1}{2}\lambda\right) = n\left(\frac{1}{2} \times 20\right)$$

Untuk
$n = 1 \rightarrow s = 10$ cm
$n = 2 \rightarrow s = 20$ cm
$n = 3 \rightarrow s = 30$ cm
Jadi, kedudukan simpul (s) untuk $n = 1$ berada pada jarak 10 cm, $n = 2$ berada pada jarak 20 cm, dan $n = 3$ berada pada jarak 30 cm dari ujung pemantulan.

Contoh 1.10

Pada percobaan Melde terbentuk 3 perut gelombang dari senar yang panjangnya 1,5 m. Jika pada ujung kawat digantungkan beban 15 g dan massa senar 3 g, tentukan:
a. bentuk gelombang senar tersebut;
b. panjang gelombang pada senar;
c. cepat rambat gelombang;
d. frekuensi sumber getar.

Jawab:
Diketahui:
l = 1,5 m;
m_{beban} = 15 g = $1{,}5 \times 10^{-2}$ kg;
m_{senar} = 3 g = 3×10^{-3} kg.

Tugas Anda 1.5

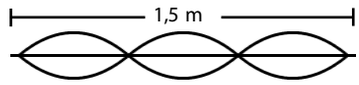
Gelombang stasioner terbentuk jika superposisi terjadi dari dua gelombang yang frekuensi dan amplitudo sama tapi fasenya berlawanan. Jika frekuensi dan amplitudo dibuat tidak sama, gelombang apa yang terjadi?



Tantangan untuk Anda

Kawat untuk saluran transmisi listrik yang massanya 40 kg diikat antara dua menara tegangan tinggi yang jaraknya 200 m. Salah satu ujung kawat dipukul oleh teknisi yang berada di salah satu menara, sehingga timbul gelombang yang merambat ke menara yang lain. Jika gelombang pantul terdeteksi setelah 10 s, berapa tegangan kawat?

a. Bentuk gelombang



b. Panjang gelombang diperoleh dari persamaan

$1\frac{1}{2}\lambda = 1\frac{1}{2}$ m

$\lambda = 1$ m

Jadi, panjang gelombang pada senar adalah 1 m.

c. $\mu = \frac{m_{senar}}{l} = \frac{3 \times 10^{-3}}{1{,}5} = 2 \times 10^{-3}$ kg/m

$F = m_{beban} \times g = 1{,}5 \times 10^{-2} \times 10 = 0{,}15$ N

$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{0{,}15}{2 \times 10^{-3}}} = \sqrt{75} = 5\sqrt{3}$ m/s

Jadi, cepat rambat gelombang adalah $5\sqrt{3}$ m/s.

d. Frekuensi sumber getar

$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{5\sqrt{3}}{1} = 5\sqrt{3}$ Hz

Jadi, frekuensi sumber getar adalah $5\sqrt{3}$ Hz.

Tes Kompetensi Subbab B

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Seutas tali yang panjangnya 100 cm, salah satu ujungnya digetarkan harmonik naik-turun dengan frekuensi $\frac{1}{8}$ Hz dan amplitudo 16 cm, sedangkan ujung lainnya terikat. Getaran merambat dengan laju 4,5 cm/s. Tentukan:
 a. amplitudo gelombang di titik yang berjarak 61 cm dari titik asal getaran;
 b. simpangan gelombang di titik tersebut setelah tali bergetar selama $16\frac{2}{9}$ s;
 c. letak simpul ke-4 dan perut ke-3 dari titik asal getaran.
2. Seutas tali panjangnya 4 m. Satu ujung tali diikat ke dinding dan ujung tali lainnya digetarkan dengan amplitudo 5 cm, serta periode 0,25 s, sehingga gelombang pada tali dapat merambat dengan kelajuan 50 cm/s. Sebuah titik P pada jarak $x = 1{,}6$ m dari ujung pemantulan, tentukanlah:
 a. persamaan simpangan gelombang datang dan gelombang pantul di titik P;
 b. persamaan simpangan superposisi gelombang di titik P.
3. Salah satu ujung dari seutas tali yang memiliki panjang 115 cm digetarkan harmonik naik-turun, sedangkan ujung lainnya dibiarkan bebas bergerak.
 a. Berapa panjang gelombang yang bergerak pada tali jika perut ke-3 berjarak 15 cm dari titik asal getaran?
 b. Di mana letak simpul ke-2 diukur dari titik asal getaran?
4. Sebuah gelombang yang frekuensinya 500 Hz memiliki kecepatan 350 m/s.
 a. Berapakah jarak antara dua titik agar sudut fasenya berbeda sebesar 60°?
 b. Berapakah perbedaan sudut fase suatu titik yang bergetar dalam selang waktu 10^{-3} sekon?
5. Sebuah gelombang merambat dari titik O ke titik P dengan cepat rambat 4 m/s, frekuensi 2 Hz, amplitudo 5 cm, dan jarak OP = 3 m. Tentukan simpangan titik P saat O telah bergetar selama 1,5 s.
6. Tentukan sudut fase gelombang di titik P, jika titik O telah bergetar selama 2 sekon, dengan jarak titik O ke P adalah 4 meter dan besar cepat rambat gelombang 8 m/s.
7. Seutas tali yang panjangnya 6 m direntangkan horizontal. Salah satu ujungnya digetarkan dan ujung lainnya tetap. Setelah terjadi gelombang stasioner, ternyata perut ke-5 berjarak 3,75 m dari titik asal getaran.
 a. Berapa panjang gelombang yang terjadi?
 b. Hitung letak simpul ke-5 diukur dari titik asal getaran.

C. Sifat-Sifat Gelombang

1. Pemantulan

Gejala pemantulan gelombang (*refleksi*) dapat Anda lihat dalam kehidupan sehari-hari. Misalnya, pemantulan cahaya oleh cermin sehingga Anda dapat melihat bayangan pada cermin. Gejala pemantulan gelombang dapat pula diamati pada gelombang tali. Pada ujung tali yang kita ikatkan akan terlihat pemantulan gelombang, seperti pada **Gambar 1.13(a)**, sedangkan untuk ujung bebas ditunjukkan oleh **Gambar 1.13(b)**. Untuk lebih memahami pemantulan, Anda dapat mengamati pemantulan gelombang air yang terjadi pada tangki air (tangki riak).

Hukum pemantulan gelombang menyatakan bahwa sudut datang gelombang sama dengan sudut pantulnya. Ilustrasi pemantulan gelombang tersebut dapat dilihat pada **Gambar 1.14**. Secara matematis, pernyataan tersebut dapat dirumuskan dalam bentuk persamaan berikut.

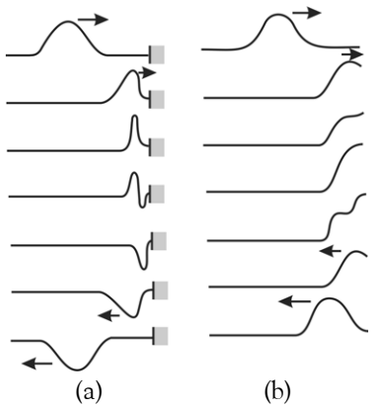
$$\theta_1 = \theta_2 \qquad (1\text{–}29)$$

Keterangan:
θ_1 = sudut datang
θ_2 = sudut pantul

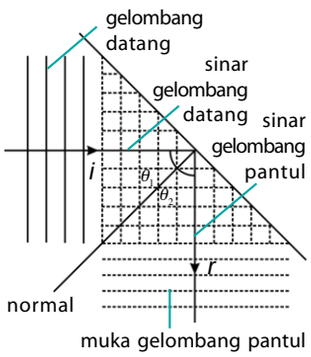
a. Pemantulan Gelombang Lingkaran oleh Bidang Datar

Bagaimana bidang datar memantulkan muka gelombang lingkaran? **Gambar 1.15** menunjukkan pemantulan gelombang lingkaran ketika mengenai bidang datar yang menghalanginya. Ternyata, gelombang pantul memiliki pola yang sama dengan gelombang datang.

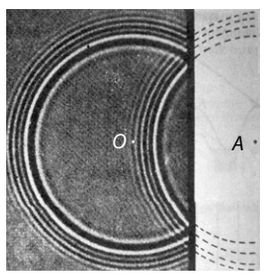
Pada **Gambar 1.15**. Titik O merupakan sumber gelombang datang dengan memerhatikan hukum pemantulan, yaitu sudut datang sama dengan sudut pantul. Oleh karena itu diperoleh bayangan O di titik A. Titik A adalah sumber gelombang pantul sehingga muka gelombang pantul adalah lingkaran-lingkaran yang berpusat di A.



Gambar 1.13
Pemantulan gelombang pada tali: (a) ujung terikat; dan (b) ujung bebas.

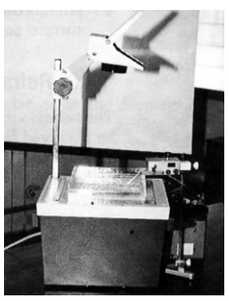


Gambar 1.14
Hukum pemantulan



Sumber: *Physics for 'O' Level*, 1999

Gambar 1.15
Pemantulan gelombang lingkaran oleh bidang datar.



Sumber: *Physics for 'O' Level*, 1999

Gambar 1.16
Tangki riak yang ditempatkan di atas OHP.

Aktivitas Fisika 1.3

Pemantulan Gelombang

Tujuan Percobaan

Mengamati pemantulan gelombang pada tangki riak.

Alat-Alat Percobaan

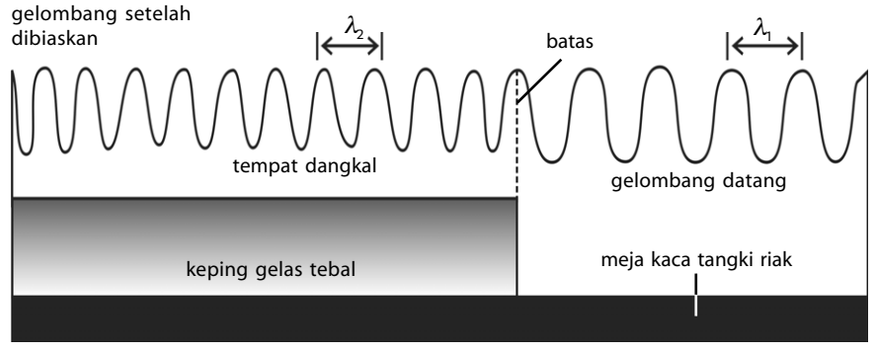
1. Wadah bak air
2. Papan
3. Kaca
4. Lampu atau OHP
5. Air

Langkah-Langkah Percobaan

1. Buatlah semacam bak air (tangki riak) dengan kaca sebagai alasnya.
2. Letakkan bak tersebut di bawah sinar lampu OHP, kemudian letakkan sebuah kertas putih di bawah bak.
3. Buatlah riak kecil dengan cara mencelupkan salah satu jari Anda di tengah-tengah bak. Perhatikan yang terjadi.
4. Masukkan papan tersebut di ujung bak, lalu gerakkan secara perlahan dalam arah horizontal sehingga terbentuk riak.
5. Jelaskan hasil yang diperoleh dan sebutkan perbedaan kedua riak tersebut. Kemudian, jelaskan pula bagaimana dengan pemantulan gelombang pada dinding.

2. Pembiasan Gelombang

Untuk mengamati pembiasan gelombang, letakkanlah keping gelas tebal di sebagian dasar tangki riak gelombang agar kedua bidang memiliki kedalaman air yang berbeda. Perbedaan kedalaman air tersebut terlihat pada **Gambar 1.17** berikut.



Gambar 1.17
Pembiasan pada tangki riak yang kedalamannya berbeda.

Dari **Gambar 1.17** terlihat bahwa panjang gelombang di tempat yang lebih dalam, lebih besar daripada panjang gelombang di tempat yang dangkal ($\lambda_1 > \lambda_2$) sehingga cepat rambat gelombangnya pun berbeda. Dengan demikian, perubahan panjang gelombang menyebabkan terjadinya pembelokan gelombang. Pembelokan gelombang dinamakan pembiasan.

Ambillah sebatang bolpoin, lalu masukkan ke dalam gelas kaca yang berisi air bening. Bolpoin tersebut akan terlihat bengkok. Peristiwa ini disebut peristiwa *pembiasan (refraksi)*. Contoh peristiwa pembiasan yang lain adalah fenomena *fatamorgana* dan pelangi.

Pembiasan terjadi akibat adanya perbedaan indeks bias. Perbedaan indeks bias menyebabkan perubahan cepat rambat gelombang. Pada peristiwa bolpoin di dalam gelas, cahaya yang dipantulkan ke mata melewati tiga macam bahan. Pertama, cahaya yang dipantulkan melewati air di dalam gelas. Kemudian, melewati bahan yang kedua, yaitu kaca gelas, dan terakhir melewati udara. Ketiga macam bahan tersebut memiliki indeks bias yang berbeda-beda sehingga cepat rambat gelombang berubah-ubah.

Hukum yang menggambarkan fenomena ini adalah Hukum Snellius tentang pembiasan. Perhatikan **Gambar 1.18(b)**, Hukum Snellius menyatakan bahwa:

1. sinar datang, garis normal, dan sinar bias terletak pada satu bidang datar;
2. sinar datang membentuk sudut θ_1 terhadap garis normal dan sinar bias membentuk sudut θ_2 terhadap garis normal dan memenuhi persamaan berikut.

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1 \qquad (1\text{–}30)$$

Keterangan:
c = cepat rambat cahaya di ruang hampa (m/s)
v = cepat rambat cahaya ketika melewati medium
n = indeks bias mutlak bahan

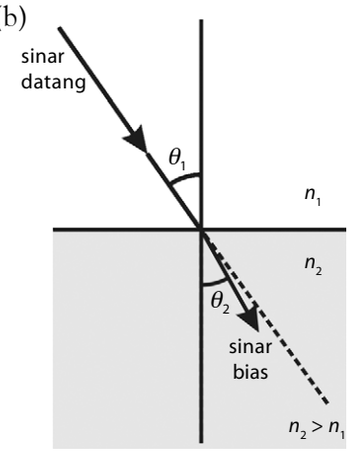
Perhatikan **Persamaan (1–30)**. Simbol n_1 dam n_2 merupakan konstanta tak berdimensi. Konstanta tersebut dinamakan indek bias. Simbol θ_1 adalah sudut yang dibentuk oleh sinar datang dan garis normal. Adapun θ_2 adalah sudut yang dibentuk oleh sinar bias dan garis normal.

(a)



Sumber: *Dokumentasi Penerbit*

(b)



Gambar 1.18
(a) Pembiasan terjadi pada bolpoin yang dicelupkan ke dalam air; (b) Skema perjalanan sinar pada proses pembiasan.

Indek bias absolut suatu bahan merupakan perbandingan kecepatan cahaya dalam ruang vakum (c) dan kecepatan cahaya di dalam medium bahan tersebut. Dengan demikian, indeks bias dinyatakan dengan persamaan.

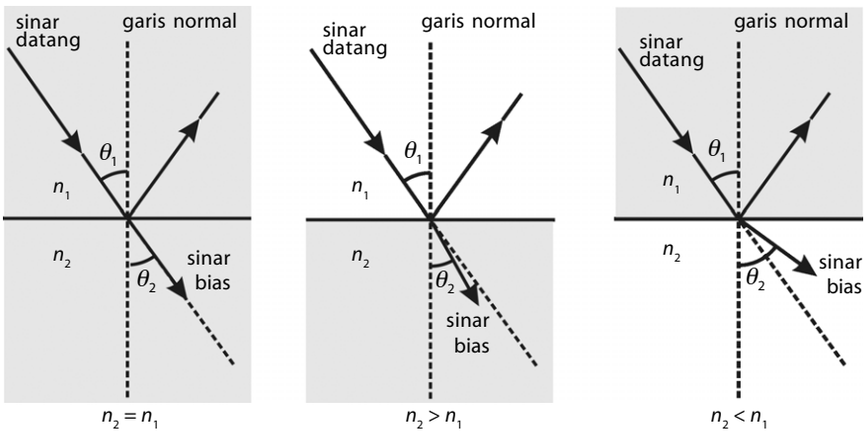
$$n = \frac{c}{v} \qquad (1–31)$$

Jika **Persamaan (1–30)** disusun kembali untuk membandingkan sudut bias (θ_2) dangan sudut datang (θ_1), diperoleh persamaan berikut.

$$\sin\theta_2 = \frac{n_1}{n_2}\sin\theta_1 \qquad (1–32)$$

Berdasarkan **Persamaan (1–32)**, dapat diketahui bahwa besarnya sudut bias bergantung pada sudut datang (θ_1), indeks bias medium pertama (n_1) dan indeks bias medium kedua (n_2).

1. Jika n_2 sama dengan n_1, θ_2 akan sama dengan θ_1. Pada keadaan ini, refraksi tidak menyebabkan pembelokan sinar. Sinar datang akan diteruskan tanpa pembelokkan arah, seperti terlihat pada **Gambar 1.19(a)**.
2. Jika n_2 lebih besar daripada n_1, θ_2 akan lebih kecil daripada θ_1. Pada keadaan ini, sinar dibiaskan mendekati garis normal dan menjauh garis perpanjangan sinar datang, seperti pada **Gambar 1.19(b)**.
2. Jika n_2 lebih kecil daripada n_1, θ_2 akan lebih besar daripada θ_1. Pada keadaan ini, sinar dibiaskan menjauhi garis normal dan garis perpanjangan sinar datang, seperti pada **Gambar 1.19(c)**.



Gambar 1.19
Pembiasan sinar bergantung pada indeks bias medium.

Tugas Anda 1.6

Menurut Anda, mengapa gelombang air laut yang begitu besar ketika sampai di pantai menjadi kecil? Apakah terjadi hal yang sama untuk laut yang berbatasan dengan daratan yang bertebing karang curam?

Contoh 1.8

Sebuah gelombang datang pada bidang batas antara dua medium dengan sudut datang 37°. Jika perbandingan antara indeks bias medium pertama dan medium kedua adalah $\frac{4}{3}$, tentukan sudut biasnya dan lukiskan pembiasan gelombang tersebut.

Jawab:

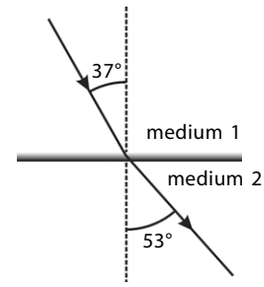
Diketahui: sudut datang $\theta_1 = 37°$;

indeks bias $n_{12} = \frac{4}{3}$.

a. Sudut bias

$$\sin\theta_2 = \frac{n_1}{n_2}\sin\theta_1$$
$$= n_{1\,2}\sin\theta_1$$
$$= \frac{4}{3}\times\sin 37^\circ = \frac{4}{3}\times 0{,}6 = 0{,}8$$
$$\theta_2 = arc\ \sin\ 0{,}8 = 53^\circ$$

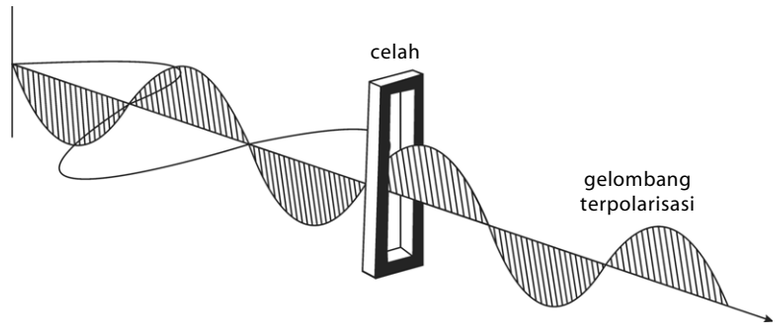
b. Lukisan pembiasan gelombang



3. Polarisasi

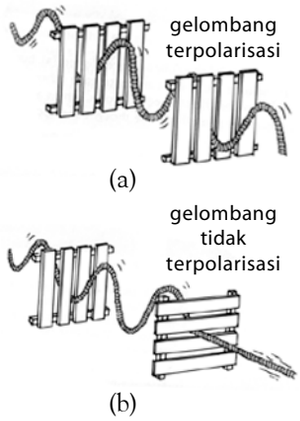
Polarisasi merupakan peristiwa yang memperlihatkan ciri khas gelombang transversal. Peristiwa polarisasi dapat terjadi karena peristiwa pemantulan, pembiasan, bias kembar, selektif, dan peristiwa bidang getar.

Peristiwa polarisasi dapat divisualisasikan dengan membayangkan gelombang transversal pada seutas tali. Perhatikan **Gambar 1.20**.



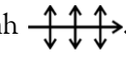
Gambar 1.20
Gelombang tali yang terpolarisasi.

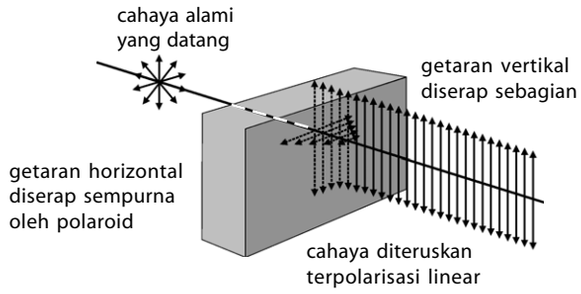
Seutas tali digetarkan dengan melewati sebuah celah sempit vertikal. Tali terlihat menyimpang seperti spiral. Setelah gelombang tali melewati celah, hanya arah getar vertikal saja yang masih tersisa, sedangkan arah getar horizontal diredam atau diserap oleh celah sempit tersebut. Gelombang yang keluar dari tali disebut gelombang terpolarisasi linear. Untuk lebih memahami polarisasi, amatilah **Gambar 1.21**.



Gambar 1.21
Polarisasi gelombang tali.

Gambar 1.21(a) memperlihatkan gelombang transversal yang dilewatkan pada dua celah yang posisinya sama dan gelombang tali ternyata lolos pada kedua celah tersebut. **Gambar 1.21(b)** memperlihatkan gelombang transversal yang dilewatkan pada dua celah yang saling menyilang tegak lurus. Ternyata, gelombang lolos pada celah yang pertama, yaitu celah yang sejajar dengan arah getar, tetapi tidak lolos pada celah yang lain, yaitu celah yang tegak lurus dengan arah getar.

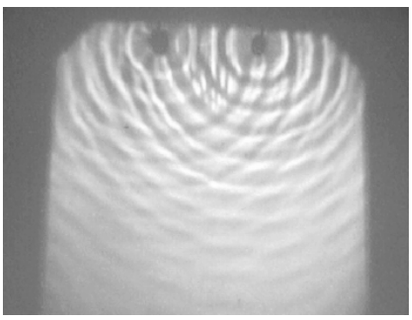
Berdasarkan **Gambar 1.21(a)** dan **Gambar 1.21(b)** dapat disimpulkan bahwa hanya gelombang transversal yang dipengaruhi celah. Gelombang yang dapat lolos dari celah hanya memiliki satu arah getar. Gelombang yang demikian disebut gelombang polarisasi. Sinar alami seperti sinar matahari bukan termasuk sinar terpolarisasi. Simbol untuk sinar yang tidak terpolarisasi adalah , sedangkan simbol untuk sinar yang terpolarisasi adalah .



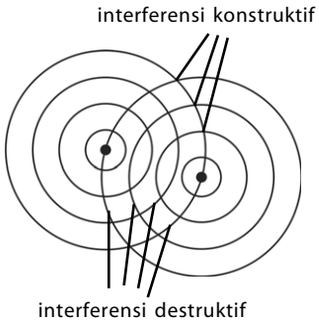
Gambar 1.22
Cahaya tak terpolarisasi dilewatkan pada sebuah kristal.

4. Interferensi Gelombang

Selain pemantulan dan pembiasan, sifat lain dari gelombang, adalah interferensi. Sifat interferensi pada gelombang adalah pola penguatan (interferensi konstruktif) dan pola penghilangan (interferensi destruktif) muka gelombang dari dua gelombang yang saling bertemu. Untuk melihat pola ini lebih jelas, perhatikan **Gambar 1.23** berikut.



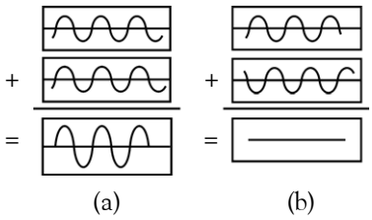
Sumber: *www.physics.umd.edu*



Gambar 1.23
Interferensi gelombang air

Anda pun dapat melakukan percobaan untuk melihat gejala interferensi gelombang. Ambillah sebuah tangki riak, kemudian buatlah celah ganda pada sebuah papan. Masukkan papan tersebut ke dalam tangki secara vertikal. Nyalakan lampu di atas tangki riak air. Kemudian, buatlah sumber gelombang dengan cara mencelupkan salah satu jari Anda ke dalam air di salah satu ujung tangki. Lihatlah pola interferensi pada kertas di bawah tangki tersebut, di bawah ujung tangki lain.

Pemasangan papan bercelah tadi sebenarnya adalah pembuatan dua sumber gelombang. Pada dinding tangki, akan tampak penguatan dan penghilangan gelombang akibat bertemunya kedua gelombang tersebut. Penguatan terjadi karena adanya kesamaan fase dari kedua gelombang. Kesamaan fase adalah dua gelombang yang memiliki frekuensi dan simpangan yang sama. Penghilangan terjadi karena adanya ketidaksamaan fase gelombang. Fase yang tidak sama adalah jika ada dua gelombang memiliki frekuensi yang sama, namun simpangannya saling berlawanan.

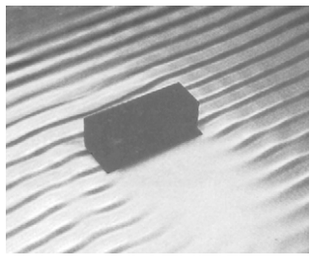


Gambar 1.24
Interferensi dua gelombang (a) interferensi konstruktif (menguatkan) dan (b) interferensi destruktif (menghilangkan).

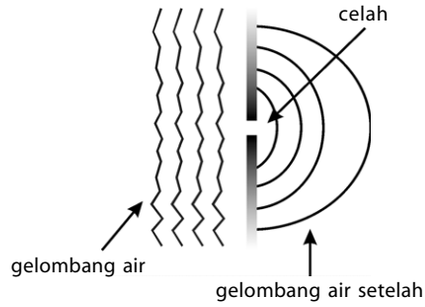
5. Difraksi Gelombang

Difraksi dalam bahasa sehari-hari dapat diartikan sebagai pelenturan. Peristiwa difraksi atau pelenturan gelombang dapat diamati dengan menggunakan tangki riak dan papan bercelah. Namun, gelombang yang timbul di air tidak dihasilkan oleh getaran tangan, melainkan dari gerakan maju mundur sebuah papan sehingga muka gelombang bukan berbentuk lingkaran. Jika Anda melakukan hal tersebut, Anda akan mendapatkan

bahwa setelah gelombang keluar dari papan bercelah, bentuk muka gelombang tidak seperti bentuk gelombang yang pertama. Pola yang akan Anda dapati, ditunjukkan oleh **Gambar 1.25**.

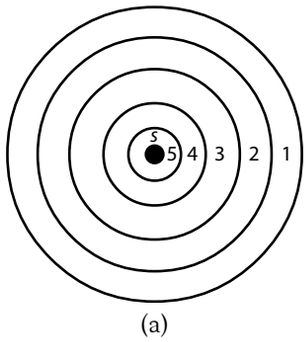


Sumber: *Physics for Scientist & Engineers with Modern Physics*, 2000

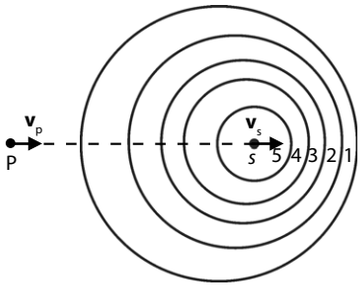


Gambar 1.25
Difraksi pada gelombang air

6. Efek Doppler



(a)



(b)

Gambar 1.26
Sumber gelombang yang bergerak pada permukaan air menyebabkan panjang gelombang lebih pendek sesuai arah gerak.

Jika Anda membuat getaran pada permukaan air menggunakan sebuah alat penggetar (*vibrator*), pada permukaan air tersebut akan terbentuk gelombang-gelombang yang merambat ke segala arah, seperti ditunjukkan **Gambar 1.26(a)**. Apa yang terjadi jika vibrator ditarik ke kanan? Jika vibrator ditarik ke kanan, akan terbentuk lingkaran gelombang air seperti pada **Gambar 1.26(b)**.

Jarak gelombang di sebelah kanan lebih rapat dibandingkan dengan jarak gelombang di sebelah kiri. Terlihat bahwa pusat dari setiap muka gelombang yang dihasilkan bergerak ke kanan sehingga jarak antara puncak ke puncak gelombang yang berdekatan di sebelah kanan lebih pendek daripada panjang gelombang di sebelah kiri. Artinya, sumber gelombang yang bergerak menyebabkan perubahan panjang gelombang. Panjang gelombang yang berubah akan menyebabkan perubahan frekuensi. Peristiwa perubahan frekuensi gelombang akibat pengaruh gerak relatif antara sumber gelombang dan pengamat dinamakan efek Doppler.

Anda dapat mengamati efek Doppler ketika berdiri di pinggir jalan dan ada mobil menuju atau mendekati Anda, bunyi mobil tersebut terdengar semakin tinggi. Demikian pula, jika mobil tersebut menjauhi Anda, bunyi mobil tersebut terdengar semakin rendah. Fenomena tersebut kali pertama diamati oleh seorang fisikawan Austria, **Christian Doppler** (1803–1853) sehingga dinamakan efek Doppler.

Perubahan bunyi mobil (menjadi tinggi atau rendah) tersebut disebabkan oleh perubahan frekuensi. Ketika mobil tersebut mendekati Anda, frekuensinya semakin besar. Sebaliknya, ketika mobil tersebut bergerak menjauhi Anda, frekuensinya semakin kecil. Perubahan frekuensi tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut.

Ketika sumber bunyi dan pendengar diam, gelombang bunyi yang dipancarkan oleh sumber bunyi memiliki panjang gelombang yang sama dengan gelombang bunyi yang diterima pendengar berlaku persamaan

$$\lambda_p = \lambda_s = \lambda = \frac{v}{f}$$

Namun, pada saat sumber bunyi bergerak dan pendengar diam maka panjang gelombang yang diterima pendengar adalah

$$\lambda_p = \frac{v \pm v_s}{f_s}$$

sehingga frekuensi yang diterima pendengar adalah sebagai berikut.

$$f_p = \frac{v}{\lambda_p} = \frac{v}{v \pm v_s} f_s \qquad (1\text{–}33a)$$

Untuk kasus sebaliknya, pada saat sumber bunyi diam dan pendengar bergerak, panjang gelombang yang diterima pendengar adalah

$$\lambda_p = \frac{v}{f_s}$$

sehingga frekuensi yang diterima pendengar adalah sebagai berikut.

$$f_p = \frac{v \pm v_p}{\lambda_p} = \frac{v \pm v_p}{v} f_s \qquad (1\text{–}33b)$$

Secara umum, persamaan efek Doppler untuk sumber bunyi dan pendengar bergerak berlaku persamaan:

$$f_p = \frac{v \pm v_p}{v \pm v_s} f_s \qquad (1\text{–}34)$$

Keterangan:
f_p = frekuensi yang diterima pendengar (Hz)
f_s = frekuensi dari sudut bunyi (Hz)
v = kecepatan gelombang bunyi (m/s)
v_p = kecepatan gerak pendengar (m/s)
v_s = kecepatan gerak sumber bunyi (m/s)

Perjanjian tanda yang digunakan dalam persamaan adalah sebagai berikut.
1. Jika pendengar mendekati sumber, $v_{pendengar}$ positif.
2. Jika pendengar menjauhi sumber, $v_{pendengar}$ negatif.
3. Jika sumber mendekati pendengar, v_{sumber} negatif.
4. Jika sumber menjauhi pendengar, v_{sumber} positif.

Contoh 1.11

Sebuah mobil bergerak dengan kecepatan 72 km/jam sambil membunyikan klakson dengan frekuensi 800 Hz. Dari arah berlawanan, seorang pengendara motor bergerak dengan kecepatan 54 km/jam. Tentukan frekuensi bunyi klakson yang didengar oleh pengendara sepeda motor tersebut, jika cepat rambat bunyi di udara adalah 340 m/s.

Jawab:
Diketahui:
v_{mobil} = 72 km/jam = 20 m/s;
$v_{pendegar}$ = 54 km/jam = 15 m/s;
v_{udara} = 340 m/s;
$f_{klakson\ mobil}$ = 800 Hz.

$$f_{pendengar} = \frac{v_{udara} + v_{pendengar}}{v_{udara} - v_{mobil}} f_{klakson\ mobil}$$

$$= \frac{340\ m/s + 15\ m/s}{340\ m/s - 20\ m/s} \times 800\ Hz = 887{,}5\ Hz$$

Jadi, pengendara sepeda motor mendengar bunyi klakson dengan frekuensi 887,5 Hz.

Tokoh

Christian Johann Doppler
(1803–1853)



Christian Johann Doppler adalah fisikawan yang lahir di Salzburg, Austria. Dia belajar di Vienna dan menjadi seorang profesor Fisika (1851). Dia terkenal dengan pengamatannya tentang variasi frekuensi gelombang suara dan gelombang cahaya karena pengaruh kecepatan gerak relatif antara sumber dan pengamat.

Sumber: *www.allbiographic.com*

Kata Kunci

- *refleksi*
- tangki riak
- sudut datang
- sudut pantul
- garis normal
- *refraksi*
- *fatamorgana*
- indeks bias
- sudut bias
- *polarisasi*
- *interferensi*
- interferensi konstruktif
- interferensi destruktif
- efek Doppler

Contoh 1.12

Kereta api bergerak meninggalkan stasiun dengan kecepatan 90 km/jam. Seorang masinis membunyikan peluitnya dengan frekuensi 600 Hz. Jika cepat rambat bunyi di udara 340 m/s, berapa frekuensi yang didengar oleh petugas di stasiun tersebut?

Jawab:

Diketahui: $v_{\text{kereta api}} = 90$ km/jam $= 25$ m/s; $v_{\text{udara}} = 340$ m/s; $v_{\text{pendengar}} = 0$ m/s.

$$f_{\text{pendengar}} = \frac{v_{\text{udara}} + v_{\text{pendengar}}}{v_{\text{udara}} + v_{\text{kereta api}}} f_{\text{peluit}} = \frac{340 \text{ m/s} + 0 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} + 25 \text{ m/s}} \times 600 \text{ Hz}$$

$$= 558{,}9 \text{ Hz}$$

Jadi, frekuensi yang didengar oleh petugas di stasiun tersebut adalah 558,9 Hz.

Tes Kompetensi Subbab C

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Sebuah gelombang datang dari udara dengan sudut datang 53° masuk ke dalam air dan dibiaskan dengan sudut bias 37°. Jika panjang gelombang tersebut di udara 2 cm, tentukan panjang gelombang di dalam air.
2. Sebuah gelombang datang pada bidang batas antara dua medium dengan sudut datang 30°. Jika indeks bias relatif medium dua terhadap medium satu adalah $\frac{1}{2}$, tentukan sudut biasnya dan lukiskan pembiasan gelombangnya.
3. Gelombang datang dari permukaan air yang dalam ke permukaan air yang dangkal dengan sudut datang 60°. Jika cepat rambat gelombang pada permukaan air yang dalam dan permukaan air yang dangkal 8 m/s dan 4 m/s, tentukan sudut biasnya.
4. Jelaskan apa yang dimaksud polarisasi.
5. Sebuah ambulans bergerak dengan kecepatan 33,5 m/s sambil membunyikan sirinenya pada frekuensi 400 Hz. Seorang pengemudi truk bergerak berlawanan arah dengan kecepatan 24,6 m/s mendengar bunyi sirine ambulans. Tentukan frekuensi yang didengar pengemudi saat:
 a. kedua mobil saling mendekati;
 b. kedua mobil saling menjauhi.
6. Ketika berdiri di trotoar, seorang anak mendengar bunyi berfrekuensi 420 Hz dari sirine mobil polisi yang mendekatinya. Setelah mobil polisi melewatinya, frekuensi bunyi yang terdengar menjadi 360 Hz. Berapa kelajuan mobil polisi tersebut? (Kecepatan bunyi di udara $= 340$ m/s).
7. Sebuah sumber bunyi memiliki frekuensi 500 Hz bergerak dengan kecepatan 20 m/s mendekati seorang pengamat yang diam. Tentukan besar frekuensi yang didengar oleh pengamat jika
 a. tidak ada angin,
 b. terdapat angin yang bergerak dengan kecepatan 5 m/s searah dengan arah sumber bunyi, dan
 c. terdapat angin yang bergerak dengan kecepatan 5 m/s berlawanan arah dengan arah gerak sumber bunyi. Cepat rambat bunyi di udara 340 m/s.

Rangkuman

1. Berdasarkan sumbernya, gelombang dikelompokkan menjadi dua macam, yaitu gelombang mekanik dan gelombang elektromagnetik.
2. Berdasarkan arah getarnya, gelombang dibedakan menjadi gelombang transversal dan gelombang longitudinal.
3. Besar cepat rambat gelombang berbanding lurus dengan panjang gelombang dan berbanding terbalik dengan waktu untuk menempuh satu gelombang.
$$v = \frac{\lambda}{T}$$
4. Besarnya daya yang ditransmisikan melalui suatu gelombang berbanding lurus dengan kuadrat amplitudo, kuadrat frekuensi, dan laju gelombang.
$$P = \frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 v$$
5. Simpangan gelombang berjalan di suatu titik dinyatakan dengan persamaan
$$y_p = \pm A \sin 2\pi f\left(t \pm \frac{x}{v}\right) = A \sin 2\pi f\left(\pm t \pm \frac{x}{v}\right)$$
6. Persamaan kecepatan sebuah titik dalam suatu gelombang terhadap waktu, adalah turunan pertama P yang dinyatakan dengan persamaan
$$v_p = \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt}\left(A \sin\left(\omega t - kx\right)\right)$$
$$v_p = \omega A \cos\left(\omega t - kx\right)$$

7. Percepatan getaran partikel di titik P merupakan turunan pertama dari kecepatan getar titik P tersebut terhadap waktu

$$a_p = \frac{dv_p}{dt} = \frac{d}{dt}\left[\omega A \cos(\omega t - k)\right]$$

$$a_p = -\omega A \sin(\omega t - kx) = -\omega^2 Y_p$$

8. Persamaan gelombang stasioner akibat pemantulan pada ujung tali bebas adalah

$$Y_p\, 2A\cos 2\pi\left(\frac{x}{\lambda}\right)\sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{\ell}{\lambda}\right)$$

dengan $2A\cos 2\pi\left(\frac{x}{\lambda}\right)$ adalah amplitudo gelombang superposisi.

Letak simpul dari ujung pemantulan pada ujung tali bebas adalah

$$x = (2n+1)\frac{1}{4}\lambda$$

Letak perut delombang dari ujung pemantulan pada ujung tali bebas adalah

$$x = n\left(\frac{1}{2}\lambda\right)$$

9. Persamaan gelombang stasioner akibat pemantulan pada ujung tali terikat adalah

$$Y_p = 2A\sin 2\pi\left(\frac{x}{\lambda}\right)\cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{\ell}{\lambda}\right)$$

dengan $2A\sin 2\pi\left(\frac{x}{\lambda}\right)$ adalah amplitudo gelombang.

Letak simpul dari ujung pemantulan pada ujung tali terikat adalah

$$x = n\left(\frac{1}{2}\lambda\right)$$

Adapun letak perut gelombang dari ujung pemantulan pada ujung tali terikat adalah

$$x = (2n+1)\frac{1}{4}\lambda$$

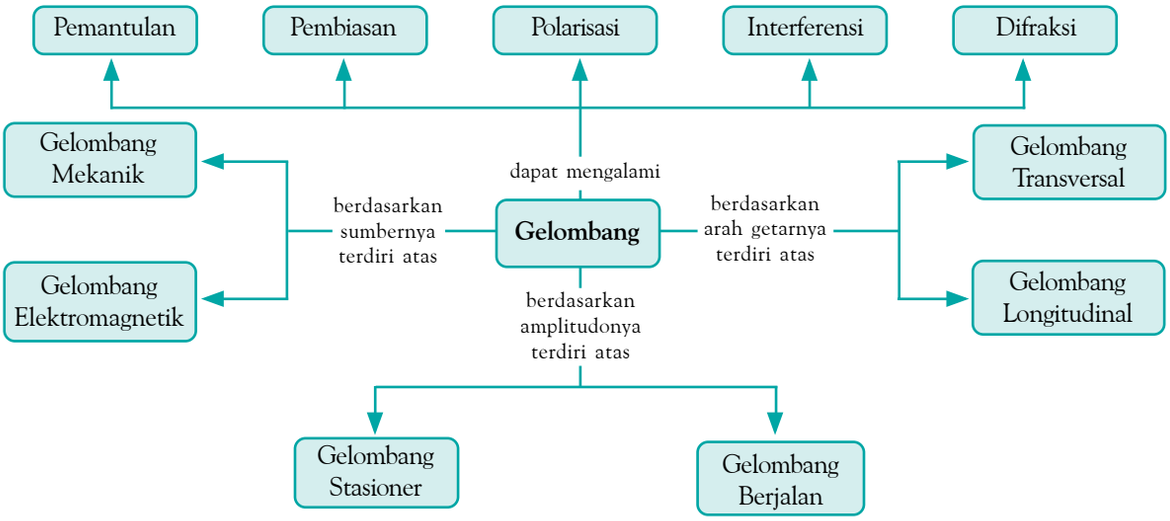
10. Gelombang dapat mengalami pemantulan, pembiasan, polarisasi, interferensi, dan difraksi.
11. Hukum Snellius pada pembiasan gelombang dinyatakan dengan persamaan

$$n_2 \sin\theta_2 = n_1 \sin\theta_1$$

12. Efek Doppler merupakan fenomena perubahan frekuensi gelombang akibat pengaruh gerak relatif antara sumber gelombang dan pengamat. Secara umum dinyatakan dengan persamaan

$$f_p = \frac{v \pm v_p}{v \pm v_s} f_s$$

Peta Konsep



Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, Anda tentu telah mengetahui jenis-jenis gelombang serta sifat-sifatnya. Dari materi bab ini, bagian mana yang Anda anggap sulit? Coba diskusikan dengan teman atau guru Fisika Anda.

Selain itu, coba Anda sebutkan manfaat lainnya yang Anda peroleh setelah mempelajari materi bab ini.

Tes Kompetensi Bab 1

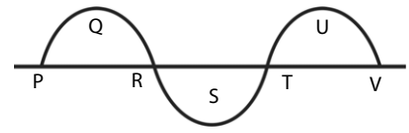
A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan.

1. Sebuah gelombang memiliki persamaan simpangan $y = 0{,}01 \sin \pi(32t + 2x)$ dalam satuan SI. Frekuensi dan panjang gelombang tersebut adalah
 a. 8 Hz dan 2 m
 b. 8 Hz dan 1 m
 c. 16 Hz dan 2 m
 d. 16 Hz dan 1 m
 e. 32 Hz dan 2 m
2. Untuk benda yang mengalami getaran harmonik, pada saat simpangan maksimum
 a. kecepatan dan percepatan maksimum
 b. kecepatan dan percepatan minimum
 c. kecepatannya maksimum dan percepatannya nol
 d. kecepatannya nol dan percepatannya maksimum
 e. simpangan maksimum, energinya maksimum
3. Cepat rambat gelombang pada tali adalah 240 cm/s dengan frekuensi 48 Hz. Jarak dua titik pada tali jika beda fase kedua titik $\frac{3}{4}$ adalah
 a. 0,50 cm
 b. 0,75 cm
 c. 3,75 cm
 d. 5,00 cm
 e. 7,50 cm
4. Gelombang S merambat dengan persamaan $y = 0{,}04 \sin \pi\left(t - \frac{x}{6}\right)$, satuan y dan x dalam meter dan t dalam sekon. Pada saat S telah bergetar 1 s, simpangan titik P yang terletak sejauh 1 m dari S adalah
 a. 0,05 m
 b. 0,04 m
 c. 0,02 m
 d. 0,01 m
 e. 0,005 m
5. Sebuah gelombang berjalan melalui titik A dan B yang berjarak 8 cm dalam arah dari A ke B. Pada saat $t = 0$, simpangan gelombang di A adalah nol. Jika panjang gelombang 12 cm dan amplitudo 4 cm, simpangan titik B pada saat fase titik A = $\frac{3\pi}{2}$ rad adalah
 a. 2 cm
 b. $2\sqrt{2}$ cm
 c. $2\sqrt{3}$ cm
 d. 3 cm
 e. 4 cm
6. Sebuah gelombang transversal dinyatakan dengan persamaan $y = \sin 2\pi\left(\frac{t}{0{,}02} - \frac{x}{15}\right)$, dengan x dan y dalam cm dan t dalam sekon, maka:
 (1) panjang gelombangnya 15 cm
 (2) frekuensinya 50 Hz
 (3) amplitudonya 1 cm
 (4) cepat rambatnya 750 cm/s
 Pernyataan yang benar adalah
 a. 1, 2, dan 3
 b. 1 dan 3
 c. 2 dan 4
 d. 4 saja
 e. semua benar

 (UMPTN 2000)
7. Pada percobaan Melde digunakan seutas dawai yang panjangnya 80 cm dan bermassa 25 g. Jika dawai ditegangkan dengan gaya sebesar 50 N, kecepatan rambat gelombang transversal pada dawai adalah
 a. 4 m/s
 b. 12,5 m/s
 c. 40 m/s
 d. $40\sqrt{10}$ m/s
 e. 400 m/s

 (Ebtanas 2000)
8. Tali yang panjangnya 5 m ditegangkan dengan gaya 2 N, kemudian dirambati gelombang transversal. Jika cepat rambat gelombang tersebut 40 m/s, massa tali adalah
 a. 6,25 gram
 b. 6,50 gram
 c. 6,75 gram
 d. 6,85 gram
 e. 6,90 gram

 (UMPTN 1995)
9. Pada percobaan *Melde* digunakan seutas benang yang panjangnya 1 meter, massa benang 5 gram. Jika beban sebesar 0,2 kg digantungkan pada benang tersebut dan $g = 10 \text{m/s}^2$ maka kecepatan perambatan gelombang pada benang adalah
 a. 5 m/s
 b. 10 m/s
 c. 20 m/s
 d. 24 m/s
 e. 40 m/s
10. Satu panjang gelombang adalah jarak antara
 a. puncak ke puncak berurutan
 b. simpul dan perut berurutan
 c. perut dan lembah berurutan
 d. puncak ke lembah berurutan
 e. simpul ke simpul berurutan
11. Sebuah gelombang laut datang memecah pantai setiap 6 sekon sekali. Jarak setiap gelombang 12 m. Jadi, laju gelombang menuju pantai sebesar
 a. 0,9 m/s
 b. 2,0 m/s
 c. 2,5 m/s
 d. 25 m/s
 e. 75 m/s
12. Gambar berikut menunjukkan gelombang transversal berjalan.



 Dalam satu periode ditempuh jarak
 a. P–Q–R–S
 b. R–S–T–U
 c. P–Q–R–S–T
 d. Q–R–S
 e. R–S–T
13. Jika gelombang air merambat dari tempat yang dalam ke tempat yang lebih dangkal maka
 a. cepat rambat dan panjang gelombang tetap
 b. cepat rambat menjadi lebih besar dan panjang gelombang tetap

c. cepat rambat mengecil dan panjang gelombang membesar
d. cepat rambat dan panjang gelombang mengecil
e. cepat rambat mengecil dan frekuensi membesar

14. Gelombang merambat melalui dua zat, mula-mula dengan kecepatan 6 m/s, sudut datang 30° dan dibiaskan pada zat kedua dengan sudut 60°. Cepat rambat gelombang pada zat kedua adalah
a. 3 m/s
b. 6 m/s
c. $6\sqrt{3}$ m/s
d. 9 m/s
e. $9\sqrt{3}$ m/s

15. Seutas tali panjangnya 5 m, dan bermassa 50 gram, ditegangkan dengan gaya 100 N. Jika frekuensi sumber getarannya 50 Hz, cepat rambat gelombang tali tersebut adalah
a. 100 m/s
b. 250 m/s
c. 500 m/s
d. 750 m/s
e. 1.000 m/s

16. Peristiwa perpaduan antara dua gelombang di suatu titik dalam waktu yang bersamaan disebut
a. pembiasan
b. pemantulan
c. superposisi
d. difraksi
e. polarisasi

17. Seutas tali yang panjangnya 4 m, kedua ujungnya diikat dengan erat. Kemudian, pada tali ditimbulkan gelombang sehingga terbentuk 8 buah perut. Letak perut kelima dari ujung terjauh adalah
a. 1,33 m
b. 1,50 m
c. 1,75 m
d. 2,00 m
e. 2,25 m

18. Jika sebuah gelombang melewati penghalang yang memiliki celah sempit, akan terjadi peristiwa
a. interferensi
b. difraksi
c. refleksi
d. refraksi
e. polarisasi

19. Jika pada percobaan Melde tegangan dibuat sembilan kali dari semula, cepat rambat gelombang pada tali tersebut menjadi
a. $\frac{1}{3}$ kali semula
b. $\frac{1}{2}$ kali semula
c. 3 kali semula
d. 9 kali semula
e. 81 kali semula

20. Sebuah sumber bunyi dengan frekuensi 1.024 Hz bergerak mendekati seorang pengamat dengan kecepatan 34 m/s. Kecepatan rambat bunyi di udara adalah sebesar 340 m/s. Jika pengamat bergerak menjauhi sumber bunyi dengan kecepatan 17 m/s, besar frekuensi bunyi yang didengar oleh pengamat adalah
a. 920 Hz
b. 1.080 Hz
c. 1.120 Hz
d. 1.220 Hz
e. 1.320 Hz

21. Andi berdiri di samping sumber bunyi yang frekuensinya 676 Hz. Sebuah sumber bunyi lain dengan frekuensi 676 Hz mendekati Andi dengan kecepatan 2 m/s. Jika kecepatan merambat bunyi di udara adalah 340 m/s, Andi akan mendengar layangan bunyi dengan frekuensi
a. 0
b. 2 Hz
c. 4 Hz
d. 6 Hz
e. 8 Hz

22. Sebuah sumber bunyi bergerak dengan kecepatan a m/s menuju pendengar yang diam sehingga frekuensi yang didengar oleh pendengar adalah f_1. Jika sumber bunyi tersebut diam, sedangkan pendengar bergerak dengan kecepatan a m/s mendekati sumber bunyi, frekuensi yang didengar oleh pendengar adalah f_2. Jika cepat rambat bunyi di udara v m/s, perbandingan $f_1 : f_2$ adalah
a. 1
b. $\frac{1}{1-\frac{a}{v}}$
c. $\frac{1}{1+\frac{a}{v}}$
d. $\frac{1}{1-\frac{a^2}{v^2}}$
e. $\frac{1}{1+\frac{a^2}{v^2}}$

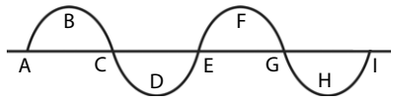
23. Seorang penerbang yang pesawat terbangnya menuju ke menara bandara mendengar bunyi sirine menara dengan frekuensi 2.000 Hz. Jika pada saat itu sirine memancarkan bunyi dengan frekuensi 1.700 Hz dan cepat rambat bunyi di udara 340 m/s, kecepatan pesawat terbang tersebut adalah
a. 196 km/jam
b. 200 km/jam
c. 216 km/jam
d. 220 km/jam
e. 236 km/jam

24. Sebuah gelombang berjalan melalui titik A dan B yang berjarak 8 cm. Pada saat $t = 0$, simpangan gelombang di A adalah 0. Jika panjang gelombangnya 12 cm dan amplitudonya 4 cm, simpangan titik B pada saat fase titik A $= \frac{3\pi}{2}$ adalah ... cm.
a. 2
b. $2\sqrt{2}$
c. $2\sqrt{3}$
d. 3
e. 4

25. Seutas tali panjangnya 40 m digetarkan transversal. Laju rambat gelombang transversal pada tali tersebut 50 m/s. Jika gaya tegangan pada tali tersebut 2,5 N, massa tali adalah
a. 0,12 kg
b. 0,09 kg
c. 0,08 kg
d. 0,04 kg
e. 0,03 kg

B. Jawablah pertanyaan berikut ini dengan tepat.

1. Pada suatu saat bentuk gelombang transversal sebagai fungsi dari tempat kedudukan x ditunjukkan seperti pada gambar berikut.



 Tentukan dua titik yang fasenya sama.
2. Interferensi yang dapat menghasilkan gelombang stasioner dapat diperoleh dari percobaan Melde. Apakah yang dimaksud dengan gelombang stasioner? Jelaskan dengan mempergunakan gambar.
3. Seutas tali dengan panjang AB, digetarkan harmonik selama 4 s di ujung A, sehingga menghasilkan gelombang transversal berjalan dengan kecepatan 60 m/s. Frekuensi gelombang 10 Hz dan amplitudonya 2 cm. Titik B berada 5 m dari A. Jika A mulai digerakkan ke atas, hitunglah:
 a. simpangan di B;
 b. fase di B.
4. Persamaan sebuah gelombang transversal berjalan adalah $y = \sin 60\pi\left(10x - \frac{2t}{0{,}01}\right)$, dengan y dan x dinyatakan dalam satuan m dan t dinyatakan dalam satuan s. Hitunglah:
 a. amplitudonya;
 b. panjang gelombangnya;
 c. cepat rambatnya;
 d. periodenya.
5. Persamaan gelombang longitudinal berjalan dalam batang adalah $y = -10^{-7} \sin 3.400\pi\left(t - \frac{x}{17.000}\right)$, y dan x dalam cm dan t dalam s. Hitunglah besar:
 a. amplitudo gelombang;
 b. panjang gelombang;
 c. cepat rambat gelombang;
 d. periode gelombang.
6. Diketahui, persamaan gelombang berjalan $y = 4\sin\left(200\pi t - \frac{\pi x}{17}\right)$, dengan y dan x dinyatakan dalam satuan cm dan t dinyatakan dalam satuan s. Tentukan nilai dari:
 a. frekuensi gelombang;
 b. panjang gelombang;
 c. cepat rambat gelombang tersebut.
7. Sebuah gelombang berjalan dari titik A ke titik B dengan amplitudo 1 cm dan periode 0,2 sekon. Jarak AB = 40 cm. Jika besar cepat rambat gelombang tersebut 2,5 m/s, tentukan:
 a. selisih fase A dan B;
 b. simpangan di B saat titik A melalui kedudukan seimbangnya.
8. Sebuah gelombang stasioner dibentuk dari interferensi dua buah gelombang, yang masing-masing memiliki amplitudo $= \pi$ cm, bilangan gelombang $k = \left(\frac{\pi}{2}\right)$ /cm, dan frekuensi sudut $\omega = 10\pi$ rad/s.
 a. Hitung jarak antara dua perut gelombang yang berurutan.
 b. Berapa amplitudo gelombang stasioner di $x = 0{,}25$ cm?
9. Sebuah sumber bunyi berfrekuensi 600 Hz bergerak dengan kecepatan 20 m/s mendekati seorang pengamat yang diam. Tentukan frekuensi yang didengar oleh pengamat, jika:
 a. tidak ada angin;
 b. terdapat angin yang bergerak dengan kecepatan 10 m/s, searah dengan arah sumber bunyi;
 c. terdapat angin yang bergerak dengan kecepatan 10 m/s, berlawanan dengan arah gerak sumber bunyi?
10. Sebuah mobil yang bergerak dengan kecepatan 20 m/s. Pada arah berlawanan bergerak mobil ambulans dengan kecepatan 16 m/s. Ambulans membunyikan sirine sehingga terdengar bunyi sirine berfrekuensi 800 Hz. Tentukan frekuensi sirine yang terdengar oleh pengemudi mobil tersebut, jika angin bertiup dengan kecepatan 5 m/s
 a. searah gerak ambulans;
 b. searah gerak mobil.

Bab 2



Sumber: *Physics Today*, 1995

Cahaya merupakan gelombang elektromagnetik yang banyak digunakan untuk kepentingan teknologi komunikasi.

Gelombang Cahaya

Hasil yang harus Anda capai:

menerapkan konsep dan prinsip gejala gelombang dalam menyelesaikan masalah.

Setelah mempelajari bab ini, Anda harus mampu:

- mendeskripsikan gejala dan ciri-ciri gelombang cahaya;
- menerapkan konsep dan prinsip gelombang cahaya dalam teknologi.

Fenomena-fenomena tentang cahaya sering Anda jumpai dalam kehidupan sehari-hari. Ketika turun hujan pada siang hari, kadang-kadang kita dapat menikmati indahnya pelangi yang menghiasi cerahnya langit. Apakah sebenarnya pelangi itu?

Cahaya merupakan gelombang elektromagnetik. Pada Bab 1 Anda telah mempelajari gelombang mekanik, misalnya gelombang air dan gelombang tali. Apakah perbedaan antara gelombang elektromagnetik dan gelombang mekanik?

Manusia telah memanfaatkan gelombang elektromagnetik dalam bidang transportasi, astronomi, militer, dan geografi. Tahukah Anda bagaimana gejala dan ciri-ciri gelombang elektromagnetik khususnya cahaya serta penerapannya? Jawaban atas pertanyaan-pertanyaan tersebut dapat Anda temukan pada bab ini. Oleh karena itu, pelajari bab ini dengan baik.

A. Interferensi Cahaya
B. Difraksi Cahaya
C. Polarisasi Cahaya

Tes Kompetensi Awal

Sebelum mempelajari konsep Gelombang Cahaya, kerjakanlah soal-soal berikut dalam buku latihan.

1. Apakah yang dimaksud dengan gelombang elektromagnetik?
2. Apakah cahaya termasuk gelombang elektromagnetik?
3. Berapakah kecepatan cahaya dalam ruang hampa?
4. Sebutkan sifat-sifat gelombang cahaya.



Tokoh

Augustine Fresnell
(1788–1827)



Augustine Fresnell (1788–1827) adalah fisikawan Prancis yang mengembangkan teori gelombang transversal cahaya berdasarkan hasil penemuannya tentang lensa dan interferensi. Fresnell memperlihatkan bahwa cahaya matahari terdiri atas bermacam-macam warna cahaya, yang setiap warna memiliki sudut bias tertentu. Ia juga menemukan sebuah bentuk lensa yang pada kedua permukaannya berbentuk cembung. Bentuk lensa ini dikenal sebagai lensa cembung. Lensa ini memiliki sifat mengumpulkan cahaya.

Sumber: *Science Encyclopedia*, 1998

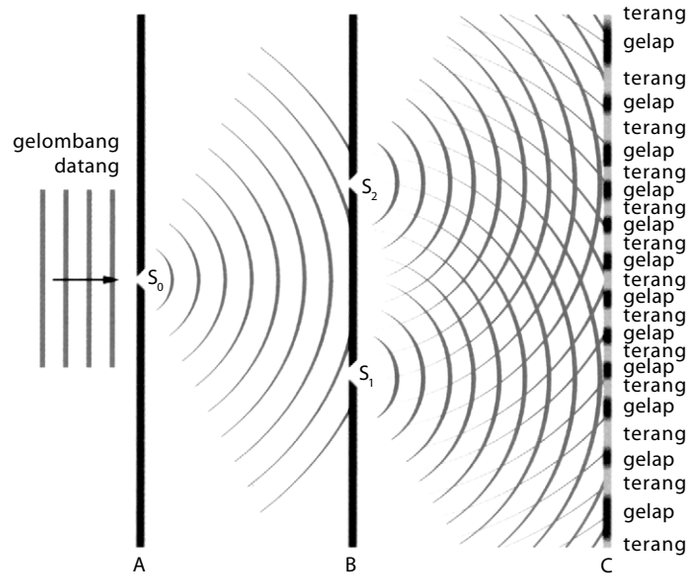
A. Interferensi Cahaya

Interferensi adalah *peristiwa penggabungan dua gelombang atau lebih yang koheren*. *Koheren* artinya gelombang memiliki *frekuensi sama* dan *beda fasenya tetap*. Seperti yang telah dibahas pada pembahasan gelombang bahwa gelombang cahaya bersifat seperti halnya gelombang bunyi yaitu dapat berinterferensi. Oleh karena itu, untuk mendapatkan interferensi cahaya pun diperlukan sumber cahaya yang koheren, yaitu sumber cahaya yang memiliki frekuensi sama dan beda fase tetap. Sumber cahaya yang koheren dapat diamati melalui percobaan yang dilakukan oleh **Young** dan **Fresnell**.

1. Percobaan Young dan Fresnell

a. Percobaan Celah Ganda Young

Percobaan ini dilakukan oleh **Young** dengan menggunakan dua penghalang. Penghalang pertama memiliki satu lubang kecil dan penghalang kedua dilengkapi dengan dua lubang kecil. Perhatikan **Gambar 2.1**.

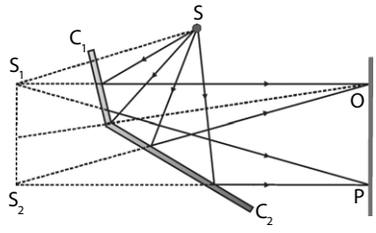


Gambar 2.1
Interferensi pada celah ganda Young

Sinar monokromatis diperoleh dari lampu sebagai sumber cahaya yang memancar melalui celah S. Kemudian, sinar dari celah S dipancarkan ke penghalang kedua. Dua celah pada penghalang kedua, yaitu S_1 dan S_2 yang dipasang sejajar dengan S akan berfungsi sebagai pemancar sinar-sinar koheren. Kedua berkas dari celah-celah S_1 dan S_2 ini berinterferensi pada layar C. Hasil interferensi berupa garis terang dan garis gelap.

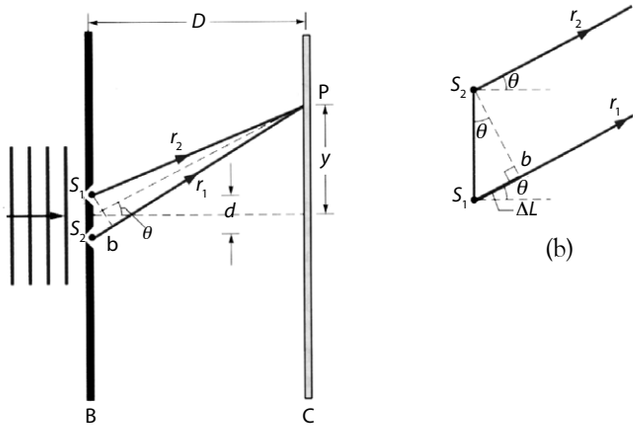
b. Percobaan Fresnell

Dengan menggunakan sebuah sumber cahaya S, **Fresnell** memperoleh dua sumber cahaya S_1 dan S_2 yang koheren dari hasil pemantulan dua cermin. Perhatikan **Gambar 2.2**.



Gambar 2.2
Percobaan **Fresnell** untuk menunjukkan interferensi cahaya.

Pada **Gambar 2.2** tersebut dapat dilihat bahwa S adalah sumber sinar monokromatis. S_1 dan S_2 adalah bayangan dari S oleh cermin C_1 dan C_2. Dengan demikian, sinar-sinar yang datang pada layar seolah-olah berasal dari S_1 dan S_2. Gelombang cahaya dari S_1 dan S_2 ini akan saling berinterferensi pada layar dan hasilnya bergantung pada selisih dari lintasan kedua sinar itu. Perlu Anda ketahui, jika kedua sumber cahaya memiliki amplitudo yang sama pada tempat terjadinya inteferensi minimum, akan terbentuk garis gelap. Sebaliknya, jika amplitudo tidak sama, interferensi minimumnya tidak gelap sama sekali.



Gambar 2.3
(a) Sinar gelombang dari celah S_1 dan S_2 berinterferensi di titik P.
(b) Untuk $D \gg d$, r_1 dan r_2 dianggap sejajar dan membentuk sudut θ terhadap sumbu tengah.

Perhatikan **Gambar 2.3**, gelombang cahaya datang menuju celah S_1 dan celah S_2 yang terletak pada bidang B. Cahaya tersebut terdifraksi oleh kedua celah tersebut dan menghasilkan pola interferensi pada layar C.

Kita dapat menentukan di mana setiap pita terang atau pita gelap terletak pada layar dengan memberikan sudut θ dari sumbu tengah terhadap garis gelap atau garis terang tersebut. Untuk menentukan besarnya θ, kita harus menghubungkannya dengan ΔL. Perhatikan **Gambar 2.3(b)**. Titik b merupakan sebuah titik yang terletak pada r, sedemikian rupa sehingga jarak b ke P sama dengan S_2 ke P. dengan demikian, ΔL sama dengan jarak dari S_1 ke b. Hubungan antara jarak dari S_1 ke b dan θ ini sangat rumit. Namun, kita dapat menyederhanakannya dengan menganggap bahwa susunan jarak celah terhadap layar (D) jauh lebih besar daripada jarak antara kedua celah (d). Dari gambar, terlihat bahwa sinar gelombang r_1 dan r_2 adalah sejajar dan membentuk sudut θ terhadap sumber pusat. Perhatikan **Gambar 2.3(b)**. Ternyata, sudut $S_1S_2b = \theta$ yang dibentuk oleh sumbu pusat dan sumbu r_1. Dengan demikian, kita dapat dengan mudah menentukan bahwa

$$\sin \theta = \frac{\Delta L}{d}$$

$$\Delta L = d \sin \theta \qquad (2\text{–}1)$$

Persamaan (2–1) merupakan persamaan untuk menentukan jarak tempuh antara sinar r_1 dan r_2 terhadap P. Untuk interferensi maksimum (interferensi konstruktif), telah diketahui bahwa ΔL pasti nol atau bilangan genap dari panjang gelombang. **Persamaan (2–1)** dapat ditulis sebagai berikut.

Pembahasan Soal

Seberkas cahaya monokromatis dijatuhkan pada dua celah sempit vertikal berdekatan dengan jarak d = 0,01 mm. Pola interferensi yang terjadi ditangkap layar pada jarak 20 cm dari celah. Diketahui bahwa jarak antara garis gelap pertama sebelah kiri ke garis gelap sebelah kanan adalah 7,2 mm. Panjang gelombang cahaya tersebut adalah

a. 180 nm
b. 270 nm
c. 360 nm
d. 720 nm
e. 1.800 nm

SPMB 2003

Pembahasan:
Jarak pola gelap ke-1 ke pusat adalah

$$y = \frac{7{,}2\times10^{-3}\text{ m}}{2} = 3{,}6\times10^{-3}\text{ m}$$

Dari soal diketahui:
$m = 1$; $d = 10^{-5}$ m; $D = 0{,}2$ m
sehingga

$$\frac{yd}{D} = \left(m-\frac{1}{2}\right)\lambda$$

$$\lambda = \frac{yd}{D\left(m-\frac{1}{2}\right)}$$

$$\lambda = \frac{3{,}6\times10^{-3}\text{ m}\times10^{-5}\text{ m}}{0{,}2\text{ m}\times\frac{1}{2}}$$

$$\lambda = \frac{3{,}6\times10^{-3}\text{ m}\times10^{-5}\text{ m}}{0{,}2\text{ m}\times\frac{1}{2}}$$

$$\lambda = 3{,}6\times10^{-7}\text{ m} = 360\text{ nm}$$

Jawaban: c

$$\Delta L = d \sin \theta = m\lambda \qquad (2\text{–}2)$$

dengan $m = 0, 1, 2, 3, \ldots$. Untuk terang pusat, kita memberikan $m = 0$, pita terang pertama $m = 2$, dan seterusnya.

Adapun untuk interferensi minimum (interferensi destruktif), ΔL pasti bilangan ganjil kali setengah gelombang **Persamaan (2–1)** dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\Delta L = d \sin \theta = \left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda \qquad (2\text{–}3)$$

dengan $m = 0, 1, 2, 3, \ldots$.
Untuk gelap pertama, kita memberikan $m = 0$, pita gelap kedua $m = 1$, dan seterusnya.

2. Menentukan Jarak Pita Terang ke-*m* atau Pita Gelap ke-*m* dari Terang Pusat

Pada pembahasan sebelumnya, telah disebutkan bahwa pola interferensi pada layar berupa pita terang dan pita gelap. Perhatikan **Gambar 2.1**. Kita dapat menentukan kedudukan pita terang ke-m atau pita gelap ke-m pada layar. Perhatikan kembali **Gambar 2.3(a)**. Oleh karena D jauh lebih besar daripada d ($D \gg d$), sudut θ bernilai sangat kecil. Untuk sudut yang sangat kecil akan berlaku $\sin \theta \approx \tan \theta$. Dari **Gambar 2.3(a)**, kita dapat menentukan bahwa

$$\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{y}{D} \qquad (2\text{–}4)$$

Untuk pita terang, masukkan **Persamaan (2–4)** ke **Persamaan (2–2)** sehingga diperoleh:

$$\frac{yd}{D} = m\lambda \qquad (2\text{–}5)$$

Untuk pita gelap, masukkan **Persamaan (2–4)** ke **Persamaan (2–3)** sehingga diperoleh.

$$\frac{yd}{D} = \left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda \qquad (2\text{–}6)$$

Keterangan:
d = jarak antarcelah pada layar
y = jarak terang/gelap ke-m dari pusat
D = jarak layar ke celah
λ = panjang gelombang cahaya
Dalam hal ini, $m = 0, 1, 2, 3, \ldots$.



Tantangan untuk Anda

Seberkas cahaya monokromatis dijatuhkan pada dua celah sempit vertikal berdekatan dengan jarak d = 0,01 mm. Pola interferensi yang terjadi ditangkap pada jarak 20 cm dari celah. Diketahui bahwa jarak antara garis gelap pertama di sebelah kiri ke garis gelap pertama di sebelah kanan adalah 7,2 mm. Hitunglah panjang gelombang berkas cahaya tersebut.

Contoh 2.1

Untuk menentukan panjang gelombang sinar yang dipancarkan oleh lampu pijar natrium, sinar ini dilewatkan pada dua celah yang berjarak 0,5 mm. Pada jarak 1 meter dari celah dipasang layar. Jika hasil interferensi pada layar diperoleh jarak garis terang pusat sampai dengan kelima adalah 6 mm, berapakah panjang gelombang sinar natrium tersebut?

Jawab:

Diketahui: $d = 0{,}5 \text{ mm} = 5 \times 10^{-4} \text{ m}$; $y = 6 \text{ mm} = 6 \times 10^{-3} \text{ m}$;
$m = 5$; $D = 1 \text{ m}$.

$$m\lambda = \frac{yd}{D}$$

$$5\lambda = \frac{(6\times10^{-3}\text{ m})(5\times10^{-4}\text{ m})}{1}$$

$$\lambda = 6 \times 10^{-7} = 6.000 \text{ Å}$$

Jadi, panjang gelombang sinar natrium adalah 6.000 Å.

Contoh 2.2

Pada sebuah percobaan interferensi digunakan dua celah sempit. Jarak antara kedua celah itu 2 mm dan diletakkan pada jarak 2 m ke layar, garis gelap pertama dari pusat yang jaraknya 0,3 mm. Hitunglah panjang gelombang cahayanya.

Jawab:

$d = 2 \text{ mm} = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$
$m = 1$
$D = 2 \text{ m}$
$y = 0{,}3 \text{ mm} = 3 \times 10^{-4} \text{ m}$ (interferensi gelap)
Dari **Persamaan (2–6)** diperoleh

$$\frac{yd}{D} = (2\text{ m} - 1)\ \frac{1}{2}\lambda \Rightarrow \frac{(3\times10^{-4}\text{ m})(2\times10^{-3}\text{ m})}{2\text{ m}} = (2\ (1) - 1)\ \frac{1}{2}\lambda$$

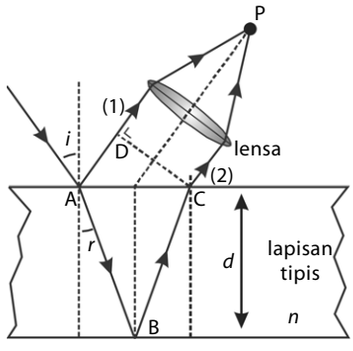
$$3 \times 10^{-7}\text{ m} = \frac{1}{2}\lambda \Rightarrow \lambda = 6 \times 10^{-7}\text{ m} = 6.000 \text{ Å}$$

Jadi, panjang gelombang cahayanya adalah 6.000 Å.

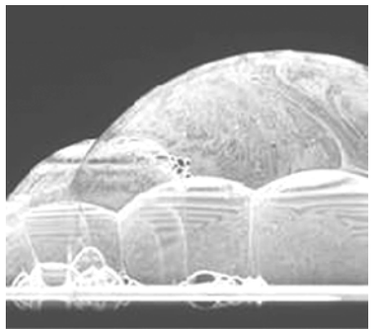
3. Interferensi oleh Lapisan Tipis

Pemantulan cahaya matahari oleh *permukaan minyak* yang dicampur dengan air akan memperlihatkan garis-garis berwarna pada minyak. Spektrum warna ini memperlihatkan adanya *peristiwa interferensi* oleh lapisan minyak yang tipis itu. Interferensi tersebut dapat berupa interferensi maksimum maupun interferensi minimum. Interferensi antara gelombang yang dipantulkan oleh lapisan tipis ditunjukkan pada **Gambar 2.4**.

Seberkas sinar datang mengenai lapisan tipis dengan sudut datang *i* akan dibiaskan dan sebagian lagi dipantulkan kembali ke permukaan. Sinar yang dipantulkan dilewatkan pada sebuah lensa positif dan difokuskan di titik P. Berkas cahaya di titik P merupakan hasil interferensi berkas cahaya (1) dan (2), dengan (1) adalah berkas cahaya yang dipantulkan langsung dan (2) adalah berkas cahaya yang mengalami pembiasan terlebih dahulu, kemudian dipantulkan.



Gambar 2.4
Interferensi oleh lapisan tipis.



Sumber: *www.designprodygzone.com*

Gambar 2.5
Interferensi oleh busa sabun.

Selisih lintasan optik yang ditempuh oleh sinar datang hingga menjadi sinar pantul ke-1 dan sinar pantul ke-2 adalah

$$\Delta S = S_2 - S_1 = n(AB + BC) - AD = n(2\ AB) - AD.$$

dengan n adalah indeks bias lapisan tipis dan AB = BC. Misalkan tebal lapisan adalah d, maka $d = AB \cos r$ sehingga

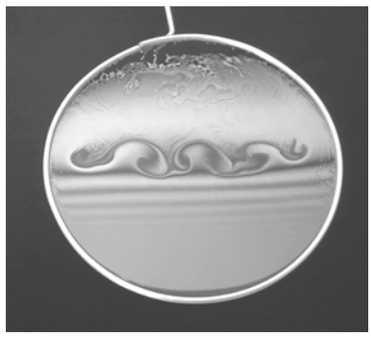
$AB = \frac{d}{\cos r}$ dan $AD = AC \sin i$ dengan $AC = 2d \tan r$, sehingga

$$\Delta S = 2n\left(\frac{d}{\cos r}\right) - (2d \tan r)\sin i = \left(\frac{2nd}{\cos r}\right) - \frac{2d \sin r \sin i}{\cos r}$$

Dengan menggunakan **Hukum Snellius** tentang pembiasan cahaya, yakni $n \sin r = \sin i$ diperoleh selisih jarak tempuh kedua sinar menjadi

$$\Delta S = \frac{2nd}{\cos r} - \frac{2nd \sin^2 r}{\cos r} = \frac{2nd}{\cos r}(1 - \sin^2 r) = \frac{2nd}{\cos r}(\cos^2 r)$$

$$\boxed{\Delta S = 2n\ d \cos r} \qquad (2\text{–}7)$$



Sumber: *www.funsci.com*

Gambar 2.6
Interferensi oleh lapisan busa sabun yang tipis.

Supaya terjadi interferensi maksimum di titik P, ΔS harus merupakan kelipatan dari panjang gelombang λ. Akan tetapi, sinar pantul di B mengalami perubahan fase $\frac{1}{2}$, maka ΔS akan menjadi:

$$\boxed{\Delta S = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda \text{ atau } \Delta S = (2k + 1)\frac{1}{2}\lambda} \qquad (2\text{–}8)$$

Interferensi maksimum sinar pantul pada lapisan tipis akan memenuhi persamaan

$$\boxed{2nd \cos r = (2k + 1)\frac{1}{2}\lambda} \qquad (2\text{–}9)$$

dengan $k = 0, 1, 2, 3...$

Persamaan (2–7) berlaku untuk indeks bias lapisan tipis lebih besar dari 1 atau $n > 1$.

Adapun untuk memperoleh interferensi minimum, kedua sinar pantul harus memiliki beda fase $\frac{1}{2}$ maka

$$\Delta S = \left(1 + \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\right)\lambda,\ \left(2 + \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\right)\lambda,\ \left(3 + \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\right)\lambda$$

$$\Delta S = 0,\ \lambda,\ 2\lambda,\ 3\lambda,\\ = k\lambda$$

Interferensi minimum dalam arah pantul memenuhi persamaan

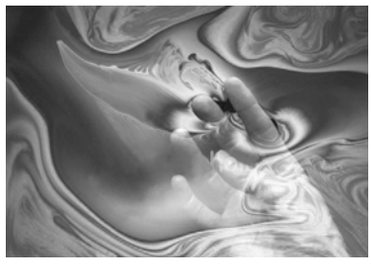
$$\Delta S = 2nd \cos r \text{ dan } \Delta S = k\lambda$$

atau

$$\boxed{\Delta S = 2nd \cos r = k\lambda} \qquad (2\text{–}10)$$

dengan: n = indeks bias

dan memenuhi syarat $n_1 < n_2$ dan $n_2 > n_3$ atau $n_1 > n_2$ dan $n_2 < n_3$.



Sumber: *www.instckphoto.com*

Gambar 2.7
Interferensi oleh lapisan minyak yang tipis.

Contoh 2.3

Tentukan tebal lapisan minimum yang dibutuhkan supaya terjadi interferensi pada sebuah lapisan tipis yang memiliki indeks bias $\frac{3}{2}$ dengan panjang gelombang 4.000 Å.

Jawab:
Interferensi maksimum pada lapisan tipis memenuhi persamaan:

$$2nd\cos r = (2k+1)\,\frac{1}{2}\lambda \Rightarrow d = \frac{(2k+1)\frac{1}{2}\lambda}{2n\cos r}$$

Supaya tebal lapisan minimum (setipis-tipisnya) maka $k = 1$ dan $\cos r = 1$ sehingga diperoleh:

$$d = \frac{(2+1)\left(\frac{1}{2}\right)(4.000\text{Å})}{2\left(\frac{3}{2}\right)(1)} = \frac{6}{12}\,(4.000\text{Å}) = 2.000\text{ Å}$$

Jadi, tebal lapisan tipis yang dibutuhkan adalah 2.000 Å.

Tugas Anda 2.1

Coba Anda perhatikan kembali **Gambar 2.5**. Gelembung tersebut sebenarnya berwarna-warni. Mengapa demikian? Anda dapat mencari jawabannya dari buku referensi atau internet.

Contoh 2.4

Tentukan panjang gelombang sinar yang digunakan jika terjadi interferensi minimum orde kedua dari lapisan tipis di udara dengan ketebalan 1.000 nm, sudut bias 45°, dan indeks bias lapisan 1,3.

Jawab:
Dengan menggunakan **Persamaan (2–10)**, diperoleh
$2nd\cos r = k\lambda$
$(2)\,(1{,}3)\,(1.000\text{ nm})\cos 45° = 2\lambda$
$\lambda = 919\text{ nm}$
Jadi, panjang gelombang yang digunakan adalah 919 nm.

Kata Kunci

- interferensi
- sinar monokromatis
- interferensi maksimum
- interferensi minimum

Tes Kompetensi Subbab A

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Apa yang dimaksud interfensi cahaya?
2. Sebuah celah ganda berjarak 5 mm di belakang celah dan pada jarak 2 meter diletakkan sebuah layar. Celah disinari dua sinar monokromatis dengan panjang gelombang 475 nm dan 600 nm. Berapakah jarak garis terang orde keempat kedua sinar pada layar?
3. Seberkas cahaya melewati dua celah sempit yang satu sama lain berjarak 4 mm. Jarak celah ke layar 1 meter dan jarak antara dua garis terang pada layar adalah $1{,}5 \times 10^{-2}$ cm. Berapakah panjang gelombang cahaya yang digunakan?
4. Untuk mengukur panjang sinar merah dilakukan percobaan sebagai berikut.
 Sinar biru dengan panjang gelombang 460 nm dijatuhkan tegak lurus pada celah ganda. Pola interferensi terjadi pada layar yang berjarak 2 m dari celah. Garis terang orde pertama berjarak 4,6 mm dari garis terang pusat. Setelah itu, sinar merah dijatuhkan pada celah. Ternyata, garis terang orde pertama berjarak 6,5 mm dari garis terang pusat. Tentukanlah panjang gelombang sinar merah itu.
5. Sebuah lapisan tipis memiliki indeks bias 4/3 digunakan untuk melihat gejala interferensi. Jika panjang gelombangnya 4.000 Å, tentukan tebal minimum lapisan tersebut supaya terjadi interferensi.

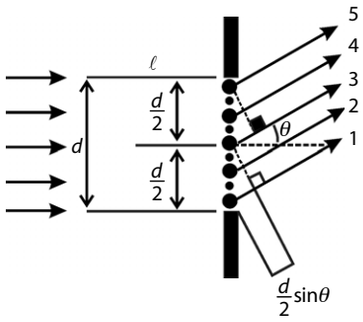
B. Difraksi Cahaya

Pada pelajaran getaran dan gelombang di Kelas X telah dibahas bahwa gelombang air yang melewati sebuah penghalang dengan sebuah celah sempit akan mengalami lenturan. Gelombang yang datang dapat berbelok setelah melalui celah tersebut. Pembelokan gelombang yang disebabkan oleh adanya penghalang berupa celah disebut difraksi gelombang. Sama halnya dengan gelombang, cahaya yang dilewatkan pada sebuah celah sempit juga akan mengalami lenturan.

Difraksi cahaya terjadi juga pada celah sempit yang terpisah sejajar satu sama lain pada jarak yang sama. Celah sempit yang demikian disebut *kisi difraksi*. Kisi adalah kepingan kaca yang digores menurut garis sejajar dan banyak jumlahnya. Jarak antara dua celah disebut tetapan kisi (d).

1. Difraksi Celah Tunggal

Difraksi pada celah tunggal akan menghasilkan pola garis terang dan gelap pada layar. Celah tunggal dapat dianggap terdiri atas beberapa celah sempit yang dibatasi titik-titik dan setiap celah itu merupakan sumber cahaya sehingga satu sama lainnya dapat berinterferensi. Perhatikan **Gambar 2.8**.



Gambar 2.8
Difraksi cahaya pada celah tunggal.

Untuk menganalisis pola difraksi, celah pada **Gambar 2.8** dibagi dua bagian. Perhatikan gelombang 1 dan 3. Gelombang 1 menempuh lintasan yang lebih jauh sebesar $\frac{d}{2}\sin\theta$ daripada gelombang 3. Sama halnya dengan gelombang 2 dan 4 yang memiliki beda lintasan sebesar $\frac{d}{2}\sin\theta$. Interferensi minimum yang menghasilkan garis gelap terjadi jika kedua gelombang berbeda fase 180° atau beda lintasannya sama dengan $\frac{1}{2}$ panjang gelombang.

$$\frac{d}{2}\sin\theta = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \sin\theta = \frac{\lambda}{d}$$

Jika celah dibagi empat bagian, didapat garis gelap ketika

$$\frac{d}{4}\sin\theta = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \sin\theta = \frac{2\lambda}{d}$$

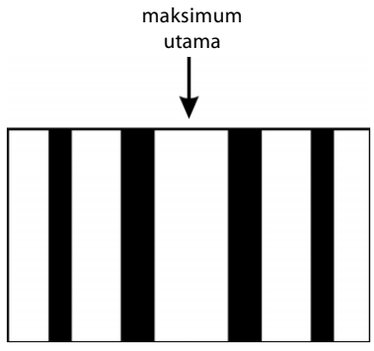
Hal serupa dengan itu, jika telah dibagi enam bagian, didapat garis gelap ketika

$$\frac{d}{6}\sin\theta = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \sin\theta = \frac{3\lambda}{d}$$

Secara umum dapat dinyatakan bahwa pita gelap ke-k terjadi jika

$$\sin\theta = \frac{k\lambda}{d} \qquad (2\text{–}11)$$

Keterangan:
d = lebar celah
θ = sudut simpang (deviasi)
k = 1, 2, 3, ...



Gambar 2.9
Maksimum utama terjadi untuk $k = 0$ atau $\theta = 0$.

Untuk $k = 0$ atau $\theta = 0$ terjadi maksimum utama (pita terang tengah) seperti diperlihatkan pada **Gambar 2.9**.

Contoh 2.5

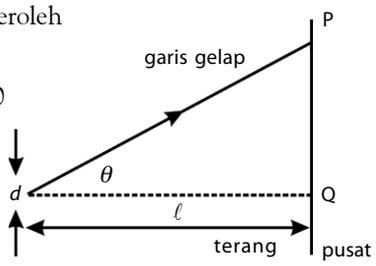
Dengan menggunakan penghalang celah tunggal pada layar tampak pola difraksi garis terang pusat dan garis gelap keempat membentuk sudut 45° terhadap garis normal. Jika cahaya yang digunakan memiliki panjang gelombang 6.000 Å, tentukan lebar celah yang digunakan.

Jawab:
Dengan menggunakan **Persamaan (2–11)**, diperoleh
$d \sin\theta = k\lambda$

$d \sin 45° = (4)(6.000\text{Å})$ maka $d\,\frac{1}{2}\sqrt{2} = 24.000$

$d = \dfrac{24.000}{\frac{1}{2}\sqrt{2}} = 34.000\text{Å}$

Jadi, lebar celahnya adalah 34.000 Å.



Untuk mendapatkan pola difraksi maksimum, beda lintasan dari interferensi minimum harus dikurangi dengan $\frac{1}{2}\lambda$. Oleh karena kedua cahaya sefase, beda fase keduanya menjadi 360°. Dua gelombang dengan beda fase 1 atau beda sudut fase 360° disebut juga sefase. Persamaan interferensi maksimum dari pola difraksinya akan menjadi

$$d \sin\theta = k\lambda - \frac{1}{2}\lambda$$

$$d \sin\theta = \left(k - \frac{1}{2}\right)\lambda$$

atau

$$\boxed{d \sin\theta = (2k-1)\frac{1}{2}\lambda} \qquad (2\text{–}12)$$

$(2k - 1)$ adalah bilangan ganjil, $k = 1, 2, 3, 4, ...$

Contoh 2.6

Tentukan lebar celah minimum yang dibutuhkan pada difraksi celah tunggal, jika diinginkan sudut difraksinya 45° dan panjang gelombang yang digunakan 600 nm untuk pola difraksi maksimum.

Jawab:
Dengan menggunakan **Persamaan (2–12)**, diperoleh
$d \sin\theta = (2k-1)\frac{1}{2}\lambda$

$$d = \frac{[2(1)-1]\left(\frac{1}{2}\right)(600\text{ nm})}{\sin 45°} = \frac{300}{\frac{1}{2}\sqrt{2}}\text{ nm} = \frac{600}{\sqrt{2}}\text{ nm} = 300\sqrt{2}\text{ nm}$$

Jadi, lebar celah minimum adalah $300\sqrt{2}$ nm.

Pembahasan Soal

Suatu berkas sinar sejajar mengenai celah yang lebarnya 0,4 mm secara tegak lurus. Di belakang celah diberi lensa positif dengan jarak titik api 40 cm. Garis terang pusat (orde nol) dengan garis gelap pertama pada layar di bidang titik api lensa berjarak 0,56 mm. Panjang gelombang sinar adalah

a. $6{,}4 \times 10^{-7}$ m
b. $6{,}0 \times 10^{-7}$ m
c. $5{,}2 \times 10^{-7}$ m
d. $5{,}6 \times 10^{-7}$ m
e. $0{,}4 \times 10^{-7}$ m

PPI 1983

Pembahasan:
Jarak titik api = jarak celah ke layar = ℓ = 40 cm.
Gelap pertama $m = 1$

$\frac{dp}{\ell} = m\lambda$

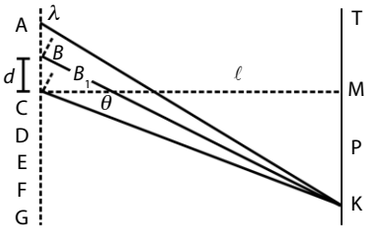
$\frac{(0{,}4\times10^{-3}\text{ m})(0{,}5\times10^{-3}\text{ m})}{0{,}4\text{ m}} = 1\lambda$

$\lambda = 5{,}6 \times 10^{-7}$ m

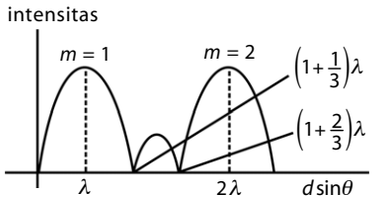
Jawaban: d

2. Difraksi pada Kisi

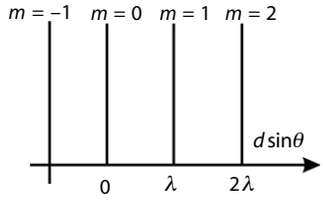
Difraksi cahaya terjadi pula pada cahaya yang melalui banyak celah sempit, dengan jarak celah sama. Celah sempit yang demikian disebut kisi difraksi atau disingkat kisi. Semakin banyak celah pada sebuah kisi, semakin tajam pola difraksi yang dihasilkan pada layar. Misalnya, pada daerah selebar 2 cm terdapat 5.000 celah. Artinya, kisi tersebut terdiri atas 5.000 celah/2 cm atau 2.500 celah/cm. Dengan demikian, jarak antarcelah adalah $\frac{1}{2.500}$ cm $= 4 \times 10^{-4}$ cm. Perhatikan **Gambar 2.10**.



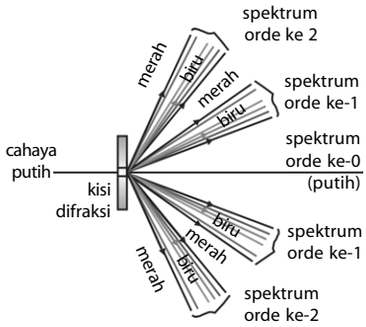
Gambar 2.10
Difraksi pada kisi



Gambar 2.11
Difraksi minimum kedua untuk $N = 2$ celah.



Gambar 2.12
Difraksi minimum kedua untuk N banyak celah.



Gambar 2.13
Difraksi cahaya putih akan menghasilkan pola berupa pita-pita spektrum.

Gambar 2.10 memperlihatkan seberkas sinar monokromatis yang dilewatkan pada sebuah kisi dan menghasilkan pola difraksi pada layar T. Pola difraksi berupa garis terang dan garis gelap secara bergantian. Difraksi maksimum terjadi jika pada layar tampak garis-garis terang. Beda lintasan yang dilewati cahaya yang datang dari dua celah berdekatan adalah 0, 1λ, 2λ, 3λ, ... atau bilangan cacah kali panjang gelombangnya. Pola difraksi maksimum utama pada kisi adalah

$$d \sin\theta = k\lambda$$

di mana k adalah orde difraksi dan d adalah jarak antarcelah atau tetapan kisi.

Difraksi minimum di antara 2 maksimum terjadi jika pada layar tampak garis-garis gelap, dan minimum pertama sesudah maksimum ke-k terjadi jika $d \sin\theta = \left(k + \frac{1}{N}\right)\lambda$ juga minimum kedua, jika $d \sin\theta = \left(k + \frac{2}{N}\right)\lambda$.

Sebagai contoh, untuk $N = 2$ celah diperoleh **Gambar 2.11**, sedangkan untuk N banyak celah diperoleh **Gambar 2.12**.

Gambar 2.13 memperlihatkan cahaya polikromatik pada celah "0" yang merupakan cahaya putih. Sinar putih polikromatik terdiri atas berbagai warna dengan panjang gelombang terkecil warna ungu dan terbesar warna merah. Dengan demikan, warna yang terdekat dengan 0 adalah warna ungu dan yang terjauh adalah warna merah yang merupakan spektrum warna lengkap, yaitu ungu, biru, hijau, kuning, jingga, dan merah. Setiap orde difraksi menunjukkan spektrum warna.

Contoh 2.7

Sebuah kisi dengan 5.000 garis/cm, dilewatkan cahaya tegak lurus dengan panjang gelombang λ. Garis terang difraksi orde pertama membentuk sudut 60° terhadap garis normal (maksimum utama). Tentukanlah panjang gelombang (λ).

Jawab:
Diketahui :

$d = \frac{1}{5.000}$ garis/cm $= 2 \times 10^{-4}$ cm; $\sin 60° = \frac{1}{2}\sqrt{3}$; $k = 1$.

Dengan menggunakan **Persaman (2–12)**, diperoleh

$d \sin\theta = k\lambda$

$(2 \times 10^{-4}\text{ cm})\ \frac{1}{2}\sqrt{3} = (1)\ \lambda \Rightarrow \lambda = 1{,}7 \times 10^{-4}$ cm

$\lambda = 17.000$ Å

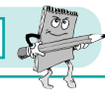
Jadi, panjang gelombang yang digunakan adalah 17.000 Å.



Tantangan untuk Anda

Tentukan daya urai sebuah celah dengan diameter 2 mm, jarak celah ke layar 1 meter dengan panjang gelombang cahayanya 590 nm.

Mari Mencari Tahu



Pernahkah Anda melihat pelangi? Pelangi merupakan salah satu gejala alam sebagai hasil difraksi. Tugas Anda, kumpulkan informasi mengenai terjadinya pelangi, kemudian presentasikan tulisan Anda di depan kelas.

3. Daya Urai Optik

Daya urai optik adalah kemampuan sebuah lensa untuk memisahkan bayangan dari dua titik yang terpisah satu sama lain pada jarak minimum. Kemampuan perbesaran alat-alat optik, misalnya lup, mikroskop, dan teropong dibatasi oleh daya urai lensa dan juga dibatasi oleh pola difraksi yang terbentuk pada bayangan benda itu.

Gambar 2.14 memperlihatkan bahwa bayangan yang terjadi merupakan pola difraksi yang disebabkan oleh *apertur* (luas sistem lensa oleh alat-alat optik tersebut).

Pola difraksi yang dibentuk oleh sebuah celah bulat terdiri atas bentuk terang pusat yang dikelilingi cincin terang dan gelap. Salah seorang ilmuwan, **Lord Rayleigh** menyimpulkan bahwa dua buah titik sumber yang terangnya sama akan terlihat terpisah jika maksimum sentral atau pusat-pusat dari pola difraksi yang satu bertepatan letaknya dengan minimum pertama dari pola difraksi titik yang lain. Pola tersebut dapat dijelaskan dengan menggunakan **Gambar 2.15**.

Jari-jari lingkaran terang (r) yang terbentuk dapat diartikan daya pisah pola difraksi yang terbatas. Jika cahaya melalui ruang hampa atau udara, daya urai dari celah lingkaran dapat ditentukan dengan persamaan

$$r = 1{,}22\frac{\lambda \ell}{D} \qquad (2\text{–}13)$$

Menurut **Rayleigh** dan **Jeans**, kriteria jarak antara kedua maksimum tersebut paling kecil sama dengan jari-jari lingkaran terang. Maksimum yang kedua jatuh pada minimum yang pertama, atau jarak sudut antara kedua pusat bayangan, yaitu

$$\sin\theta = \frac{r}{\ell} = 1{,}22\frac{\lambda}{D} \qquad (2\text{–}14)$$

Untuk sudut yang kecil,

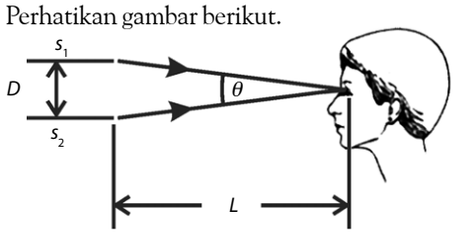
$$\theta = \frac{r}{\ell} = 1{,}22\frac{\lambda}{D} \qquad (2\text{–}15)$$

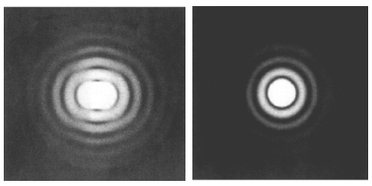
Keterangan:
r = daya urai (m)
ℓ = jarak benda dari lensa (m)
λ = panjang gelombang cahaya (m)
D = diameter bukaan lensa (m)
θ = sudut deviasi

Contoh 2.8

Ketika diameter mata diperbesar sampai 5 mm, berapa jarak minimum antara dua sumber titik yang masih dapat dibedakan oleh mata pada jarak 80 cm dari mata? Panjang gelombang cahaya di udara 600 nm dan indeks bias mata $\frac{4}{3}$.

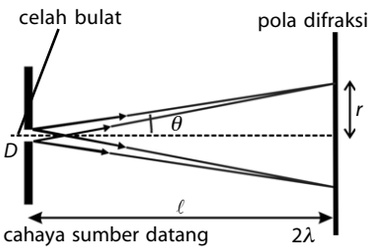
Perhatikan gambar berikut.





(a) (b)

Gambar 2.14
Bayangan dari optik fisis dua benda yang berdekatan karena (a) beririsan dan (b) terpisah dengan baik.



Gambar 2.15
Lukisan sinar dari sumber cahaya dari sebuah celah bulat.



Informasi untuk Anda



Merak jantan dengan bulu-bulu ekornya yang berwarna-warni dan berukuran lebar menyebabkan lebih kelihatan menarik dibanding merak betina. Keindahan bulu merak tersebut merupakan contoh efek difraksi gelombang cahaya oleh bulu merak.

Information for You

Male with the largest or most colorful adornments are often the most attractive to females. The extraordinary feathers of a peacock's tail are an example of diffraction effect of peacock's tail light wakes.

Sumber: *Biology Concepts & Connections*, 2006

Kata Kunci

- difraksi gelombang
- kisi difraksi
- sudut simpang (deviasi)
- difraksi maksimum
- difraksi celah tunggal
- difraksi pada kisi
- daya urai optik
- *apertur*

Jawab:

Diketahui: diameter lensa mata (D) 5 mm = 5×10^{-3} m; panjang gelombang cahaya (λ) = 600 nm = 6×10^{-7} m; indeks bias mata $n = \frac{4}{3}$.

Panjang gelombang cahaya ketika memasuki mata diperoleh dengan:

$$\lambda_{\text{mata}} = \frac{\lambda_u}{n} = \frac{6\times10^{-7}}{\frac{4}{3}}\ \text{m} = 4,5\times10^{-7}\ \text{m}$$

Jarak titik (benda) ke lensa L = 80 cm = 0,8 m.

Daya urai lensa mata dapat dihitung ($d_m = r$)

$$d_m = r = \frac{(1,22)(\lambda)(L)}{D}$$

$$= \frac{(1,22)(4,5\times10^{-7}\ \text{m})(0,8\ \text{m})}{5\times10^{-3}\ \text{m}}$$

$$= 8,78\times10^{-5}\ \text{m}.$$

Tes Kompetensi Subbab B

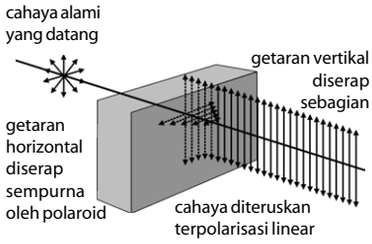
Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Celah tunggal selebar 0,2 mm disinari cahaya yang panjang gelombangnya 8.000Å. Pola difraksi ditangkap pada layar yang jaraknya 50 cm dari celah. Tentukan jarak antara garis gelap ketiga dan garis terang pusat (untuk sudut θ yang kecil, $\sin\theta \approx \tan\theta$).
2. Berapa lebar celah tunggal yang diperlukan supaya dapat terjadi interferensi maksimum orde ketiga dengan sudut difraksi 30° dari seberkas sinar monokromatis yang memiliki panjang gelombang 6.400 Å?
3. Tentukanlah daya urai sebuah celah dengan diameter 2 mm dan jarak celah ke layar 1 meter dengan panjang gelombang cahayanya 590 nm.
4. Jarak dua lampu mobil adalah 1,5 meter dan diameter pupil mata seorang anak 2 mm. Jika panjang gelombang cahaya yang dipancarkan kedua lampu tersebut rata-rata 5.500 Å, berapakah jarak mobil maksimum supaya nyala lampu itu masih dapat dipisahkan oleh mata?
5. Seorang anak membuka mata lebar-lebar sehingga diameter irisnya 0,5 cm. Jika digunakan sinar kuning dengan panjang gelombang 5.900 Å, berapakah daya pisah mata anak tersebut (dalam radian dan derajat)?

C. Polarisasi Cahaya

1. Polarisasi pada Kristal

Cahaya yang hanya memiliki arah getaran tertentu disebut cahaya terpolarisasi. Bidang tampak kedudukan arah getaran tertentu dari cahaya terpolarisasi disebut bidang polarisasi. Jika sebuah cahaya alamiah dilewatkan pada sebuah kristal, arah cahaya yang keluar dari kristal hanya dalam satu arah saja sehingga disebut cahaya terpolarisasi linear. Jika kristal menyerap sebagian arah getarnya, kristal itu disebut *dichroic*. Perhatikan **Gambar 2.16**, cahaya datang misalnya sinar alami matahari (tidak terpolarisasi) dilewatkan pada sebuah kristal. Komponen vertikal diserap oleh kristal dan cahaya yang diteruskan terpolarisasi linear.



Gambar 2.16
Cahaya tak terpolarisasi dilewatkan pada sebuah kristal.

Selain kristal, polaroid pun dapat membuat cahaya terpolarisasi. **Gambar 2.17** memperlihatkan susunan dua keping polaroid sejajar. Polaroid pertama disebut *polarisator* dan keping yang kedua disebut *analisator*.

Cahaya yang keluar dari polaroid hanya memiliki satu arah getaran tertentu atau cahaya terpolarisasi karena arah getaran lainnya diserap. **Gambar 2.17(a)** memperlihatkan polarisator dan analisator yang dipasang

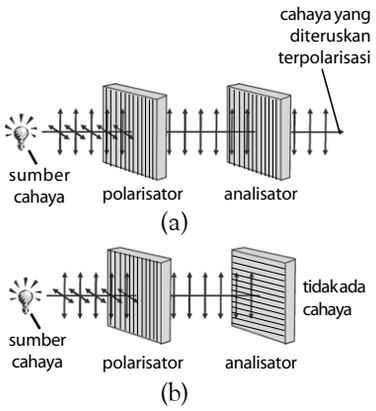
sejajar atau sama kedudukannya, cahaya yang diteruskan terpolarisasi. Pada **Gambar 2.17(b)**, arah transmisi analisator tegak lurus pada arah transmisi polarisator, tidak ada getaran yang dapat diteruskan analisator sehingga Anda tidak dapat melihat cahaya.

Jika berkas cahaya alamiah dengan intensitas I_0 dilewatkan pada sebuah polarisator ideal, intensitas cahaya yang dilewatkan adalah 50% atau $\frac{1}{2}I_0$. Akan tetapi, jika keduanya dipasang bersilangan, tidak ada intensitas cahaya yang dapat melewati analisator.

Analisator berfungsi dalam menganalisis sinar yang dilewatkan oleh polarisator. Jika analisator diputar pada saat itu, mata melihat sinar terang. Sinar meredup pada saat polarisator dan analisator saling tegak lurus dan tak ada cahaya yang diteruskan. Menurut **Etienne Louis Malus** (1775–1812), intensitas cahaya yang dilewatkan polarisator adalah $I_1 = \frac{1}{2}I_0$. Jika sudut sumbu polarisator dan analisator adalah θ, maka intensitas cahaya setelah melalui analisator adalah $I_2 = I_1 \cos^2\theta$, sehingga

$$I_2 = \frac{1}{2}I_0 \cos^2\theta \qquad (2\text{–}16)$$

Persamaan ini disebut juga **Hukum Malus**, dengan I_2 adalah intensitas cahaya yang lewat analisator dan θ adalah sudut antara polarisator dan analisator. Satuan intensitas cahaya adalah watt/m^2.



Gambar 2.17
(a) Polarisator dan analisator dipasang sejajar sehingga cahaya yang diteruskan di belakang analisator akan terpolarisasi linear.
(b) Polarisator dan analisator dipasang tegak lurus sehingga cahaya tidak diteruskan oleh analisator.

Contoh 2.9

Seberkas cahaya alamiah dilewatkan pada dua keping kaca polaroid yang arah polarisasi satu sama lain membentuk sudut 30°. Jika intensitas cahaya alamiahnya adalah 100 W/m^2, tentukan intensitas cahaya yang telah melewati kedua kaca polaroid tersebut.

Jawab:

Dengan menggunakan **Persamaan (2–16)**, diperoleh

$$I_2 = \frac{1}{2}I_0 \cos^2\theta$$

$$I_2 = \frac{1}{2}(100\ \text{W/m}^2)\cos^2 30 = (50\ \text{W/m}^2)\left(\frac{1}{2}\sqrt{3}\right)^2 = 37{,}5\ \text{W/m}^2$$

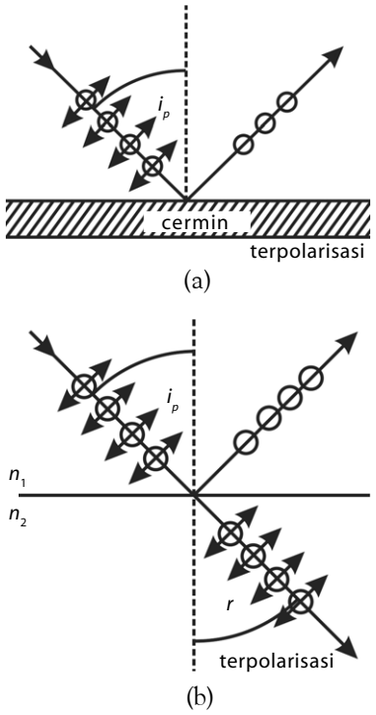
Jadi, intensitas cahaya yang dilewatkan adalah 37,5 W/m^2.

2. Polarisasi pada Pemantulan dan Pembiasan

Perhatikan **Gambar 2.18(b)**. Seberkas sinar datang yang dilewatkan pada permukaan bidang batas dua medium yang indeks biasnya berbeda, misalnya n_1 dan n_2, sebagian sinar dipantulkan dan sebagian lagi dibiaskan. Jika sinar pantul dan sinar bias saling tegak lurus (membentuk sudut 90°), sinar pantul berupa sinar terpolarisasi linear (polarisasi sempurna). Pada saat itu sudut datang disebut sudut polarisasi (I_p).

Sudut datang ini disebut sudut polarisasi atau sudut *Brewster*. **Gambar 2.18(b)** memperlihatkan sinar datang pada bidang batas. Sebagian dipantulkan dan sebagian lagi dibiaskan. Sesuai dengan Hukum Snellius: $n_1 \sin i_p = n_2 \sin r$, dengan $r + i_p = 90°$ atau $r = 90 - i_p$ maka dapat dituliskan persamaannya, yaitu

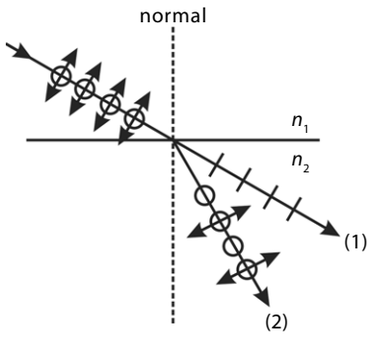
$$n_1 \sin i_p = n_2 \sin(90 - i_p) \Rightarrow n_1 \sin i_p = n_2 \cos i_p \Rightarrow \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin i_p}{\cos i_p}$$



Gambar 2.18
Polarisasi pada (a) pemantulan dan (b) pembiasan.

$$\frac{n_2}{n_1} = \tan i_p \qquad (2\text{–}17)$$

Dengan i_p adalah sudut polarisasi atau sudut *Brewster* dan n_1 serta n_2 adalah indeks bias medium satu dan medium dua.

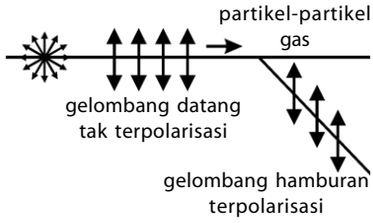


Gambar 2.19
Polarisasi pembiasan ganda.

3. Polarisasi pada Pembiasan Ganda

Pada kristal kalsit ($CaCO_3$), kuarsa (SiO_2), mika, topas, dan es, cahaya dapat mengalami pembiasan ganda karena memiliki dua nilai indeks bias. Pada **Gambar 2.19** tampak ada dua bagian sinar yang dibiaskan. Sinar (1) tidak mengikuti pembiasan menurut Hukum Snellius atau disebut sinar istimewa, sinar (2) mengikuti hukum pembiasan Snellius atau disebut sinar bias.

4. Polarisasi karena Hamburan

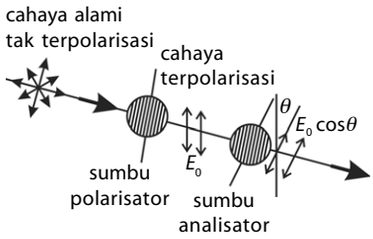


Gambar 2.20
Polarisasi karena hamburan.

Cahaya yang datang pada zat gas akan mengalami polarisasi sebagian. Elektron-elektron dalam partikel akan menyerap dan memancarkan kembali sebagian dari cahaya (**Gambar 2.20**). *Penyerapan dan pemancaran kembali cahaya oleh partikel disebut hamburan*. Langit pada siang hari tampak berwarna biru karena peristiwa hamburan. Partikel-partikel udara menyerap sinar matahari dan memancarkannya kembali, terutama sinar birunya. Pada pagi dan sore hari, partikel-partikel udara akan menghamburkan lebih banyak cahaya biru sehingga yang tersisa dari cahaya matahari adalah cahaya merah. Bulan tidak memiliki atmosfer sehingga tidak dapat menghamburkan cahaya matahari. Oleh karena itu, atmosfer Bulan terlihat gelap.

Jika cahaya tidak terpolarisasi datang pada suatu medium (gas), cahaya yang dihamburkan dapat terpolarisasi sebagian atau seluruhnya. Arah polarisasi sedemikian rupa sehingga tegak lurus terhadap bidang yang dibentuk oleh garis sinar datang dan garis penglihatan.

5. Pemutaran Bidang Polarisasi



Gambar 2.21
Pemutaran bidang polarisasi.

Gambar 2.21 memperlihatkan sebuah *polarimeter* yang terdiri atas dua buah polaroid yang dipasang pada sebuah alat yang dilengkapi dengan skala derajat dan kotak larutan. Polaroid yang dekat dengan sumber cahaya disebut polarisator, dan yang lainnya adalah analisator.

Mula-mula, mata di belakang analisator tidak melihat cahaya yang datang (gelap). Penunjuk analisator menunjukkan sudut φ_1, kemudian di antara polarisator dan analisator diletakkan bejana kaca yang berisi larutan gula. Cahaya yang melalui polarisator akan melewati larutan ini sebelum sampai ke analisator. Setelah diamati, ternyata sekarang mata melihat adanya cahaya terang. Larutan gula dalam hal ini berfungsi sebagai pemutar bidang getar. Agar menjadi lebih gelap lagi, analisator diputar sehingga menunjukkan sudut φ_2. Jadi, besarnya sudut putaran bidang getar cahaya yang dilakukan oleh larutan gula adalah

$$\varphi_1 - \varphi_2 \qquad (2\text{–}18)$$

Larutan gula tersebut disebut larutan *optik aktif*. Larutan tersebut ada yang dapat memutar bidang getar polarisasi ke kiri dan ada juga yang ke kanan. Dengan alat semacam ini, orang dapat menentukan

konsentrasi larutan optik aktif. Polarimeter yang khusus untuk menentukan konsentrasi larutan gula disebut *sacharimeter*.

Dari berbagai percobaan, disimpulkan bahwa faktor-faktor yang memengaruhi sudut putar bidang getar adalah jenis larutan, tebal larutan (panjang), dan konsentrasi larutan. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = c\ell\alpha \qquad (2\text{–}19)$$

Keterangan:
$\varphi_1 - \varphi_2$ = sudut putar bidang getar
c = konsentrasi larutan
ℓ = panjang larutan (tebal)
α = sudut putaran jenis larutan

Kata Kunci

- bidang polarisasi
- *dichroic*
- *polarisator*
- *analisator*
- sudut polarisasi/sudut Brewster
- hamburan
- polarimeter
- larutan optik aktif
- *sacharimeter*

Contoh 2.10

Jika indeks bias udara adalah 1, sudut polarisasi cahaya pada balok es adalah 53°. Tentukan indeks bias balok es tersebut.

Jawab:
Diketahui: $i_p = 53°$; $n_1 = 1$
Dengan menggunakan **Persamaan (2–17)**, diperoleh

$$\tan i_p = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_2 = n_1 \tan i_p \Rightarrow n_2 = 1 \tan 53° \Rightarrow 1{,}33$$

Jadi, indeks bias balok es adalah 1,33.

Contoh 2.11

Sebuah sacharimeter yang panjangnya 30 cm berisi larutan gula pasir dengan putaran jenis larutannya 70°. Jika digunakan sinar natrium, pemutaran bidang polarisasinya 25°, hitunglah konsentrasi larutan itu.

Jawab:
Diketahui:
ℓ = 30 cm = 0,3 m;
α = 70°;
$\varphi_1 - \varphi_2$ = 25°.
Konsentrasi larutan (c) dapat diperoleh dengan **Persamaan (2–19)**, diperoleh

$$\varphi_1 - \varphi_2 = c\ell\alpha \Rightarrow 25 = (c)\ (0{,}3\ \text{m})\ (70) \Rightarrow c = 0{,}12$$

Jadi, konsentrasi larutan adalah $c = 0{,}12 \times 100\% = 12\%$.

Tes Kompetensi Subbab C

Kerjakanlah dalam buku latihan.

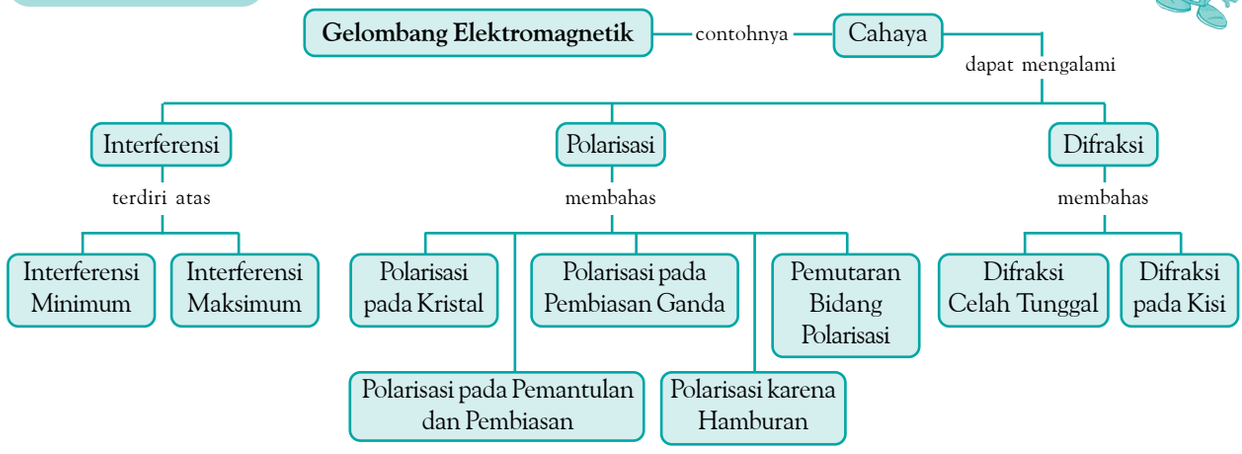
1. Diketahui sudut polarisasi suatu cahaya pada balok es adalah 55°. Jika indeks bias udara 1,0001, tentukanlah indeks bias balok es tersebut.
2. Apabila intensitas cahaya yang keluar dari dua kaca polaroid yang dipasang membentuk sudut 13° satu sama lain dari cahaya mula-mula. Tentukan besarnya sudut yang dibentuk oleh kedua kaca polaroid tersebut.
3. Sebuah sacharimeter memiliki tabung yang panjangnya 20 cm, berisi larutan gula dengan kepekatan 10% dan memiliki sudut putaran jenis 66,5°. Tentukan sudut pemutaran bidang polarisasinya jika dipergunakan sinar natrium.

Rangkuman

1. Cahaya termasuk gelombang elektromagnetik sehingga perambatannya tidak memerlukan medium.
2. Interferensi adalah peristiwa penggabungan dua gelombang atau lebih dari gelombang yang koheren.
3. Cahaya dapat berinterferensi jika sumber cahayanya koheren, artinya memiliki frekuensi sama dan beda fase tetap. Sumber cahaya yang koheren dapat diamati melalui percobaan **Young** dan **Fresnell**.
4. Interferensi cahaya menghasilkan pola gelap terang. Pola gelap dihasilkan dari interferensi destruktif (saling melemahkan) akibat penggabungan dua gelombang yang memiliki fase berlawanan. Persamaan selisih jarak yang ditempuh gelombang adalah
$$\Delta L = d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$
dengan $m = 0, 1, 2, 3, ...$
Pola terang dihasilkan dari interferensi konstruktif (saling menguatkan) akibat penggabungan dua gelombang yang memiliki fase sama. Persamaan selisih jarak yang ditempuh gelombang adalah
$$\Delta L = d \sin \theta = m\lambda$$
dengan $m = 0, 1, 2, 3, ...$
5. Jarak dari terang pusat ke pola terang ke-m adalah
$$y = \frac{D}{d} m\lambda$$
Jarak dari terang pusat ke pola gelap ke-m adalah
$$y = \frac{D}{d}\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$
6. Difraksi gelombang adalah proses pembelokan gelombang yang disebabkan oleh adanya penghalang berupa celah atau sudut penghalang yang menghalangi sebagian muka gelombang. Celah demikian disebut kisi difraksi. Jarak antar celah dalam kisi disebut tetapan kisi (d).
7. Pada difraksi celah tunggal, pita gelap ke-k terjadi jika $d \sin \theta = k\lambda$, dengan $k = 1, 2, 3, ...$, sedangkan pita terang ke-k terjadi jika $d \sin \theta = (2k-1)\frac{1}{2}\lambda$, dengan $(2k–1)$ adalah bilangan ganjil, $k = 1, 2, 3, ...$
8. Difraksi pada kisi terjadi jika cahaya dilewatkan pada celah-celah yang memiliki jarak yang sama.
9. Daya urai optik adalah kemampuan sebuah lensa untuk memisahkan bayangan dari dua titik yang terpisah satu sama lain pada jarak minimum.
10. Polarisasi adalah proses penyaringan arah getar suatu gelombang. Alat untuk menyaring arah getar ini disebut polaroid, salah satu contohnya adalah kristal.
11. Intensitas cahaya yang dilewatkan pada polarisator (keping polaroid I) adalah $I_1 = \frac{1}{2} I_0$.
Intensitas cahaya yang dilewatkan pada analisator adalah $I_2 = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \theta$ dengan θ sudut yang dibentuk antara sumbu polarisator dan sumbu analisator.

Peta Konsep





Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, tentu Anda menjadi tahu bahwa cahaya merupakan gelombang elektromagnetik yang dapat mengalami proses interferensi, difraksi, dan polarisasi. Dari semua materi pada bab ini, bagian mana yang menurut Anda sulit dipahami? Coba Anda diskusikan bersama teman atau guru Fisika Anda. Selain itu, coba Anda sebutkan manfaat yang Anda peroleh setelah mempelajari materi bab ini.

Tes Kompetensi Bab 2

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan.

1. Sudut pita terang tengah dari difraksi orde kedua yang dihasilkan oleh kisi dengan 6.250 celah/cm sebesar 60°. Maka panjang gelombang cahaya yang dipergunakan adalah
 a. 4.000 Å
 b. 4.000 $\sqrt{3}$ Å
 c. 5.000 Å
 d. 5.000 $\sqrt{3}$ Å
 e. 6.250 Å
2. Jika sinar yang jatuh tegak lurus di atas permukaan minyak di atas air, tebal lapisan minyak d, indeks biasnya n dan panjang gelombang dari cahaya yang menghasilkan interferensi maksimum λ maka persamaan yang memenuhi adalah
 a. $2\,nd = k\,\lambda$
 b. $2\,nd = (2k + 1)\,\lambda$
 c. $nd = k\,\lambda$
 d. $nd = (2k + 1)\,\lambda$
 e. $nd = \lambda$
3. Untuk menentukan panjang gelombang monokromatis digunakan percobaan Young yang datanya sebagai berikut.
 Jarak antara kedua celahnya = 0,3 mm, jarak celah ke layar = 50 cm, serta jarak antara garis gelap ke-2 dan garis gelap ke-3 pada layar = 1 mm.
 Panjang gelombang sinar monokromatis tersebut adalah
 a. 400 nm
 b. 450 nm
 c. 500 nm
 d. 580 nm
 e. 600 nm
4. Pada percobaan Young, dua celah berjarak 1 mm diletakkan pada jarak 1 m dari sebuah layar. Jika jarak terdekat antara pola interferensi garis terang pertama dan garis terang kesebelas adalah 4 mm, panjang gelombang cahaya yang menyinari adalah
 a. 1.000 Å
 b. 2.000 Å
 c. 3.500 Å
 d. 4.000 Å
 e. 5.000 Å
5. Prinsip dasar dari dua sumber cahaya koheren adalah
 a. keduanya sangat berdekatan
 b. amplitudonya sama
 c. simpangannya selalu sama
 d. beda fase keduanya adalah tetap
 e. keduanya memancarkan cahaya yang berpapasan
6. Cincin Newton terjadi karena gejala
 a. difraksi
 b. polarisasi
 c. dispersi
 d. interferensi
 e. refraksi
7. Pada percobaan Young (celah ganda), jika jarak antara dua celahnya dijadikan dua kali semula maka jarak antara dua garis gelap yang berurutan
 a. 4 kali semula
 b. 2 kali semula
 c. ¼ kali semula
 d. ½ kali semula
 e. tetap tidak berubah
8. Apabila intensitas cahaya mula-mula yang melewati dua plat-retardasi adalah I_0, antara kedua plat membentuk sudut 60°, intensitas cahaya yang dilewatkan oleh kedua plat adalah
 a. $\frac{1}{2} I_0$
 b. $\frac{1}{4} I_0$
 c. I_0
 d. $\frac{1}{8} I_0$
 e. $\frac{1}{16} I_0$
9. Sebuah polaroid memiliki polarisator dan analisator yang dipasang membentuk sudut 30°, intensitas cahaya yang diteruskan akan sebanding dengan
 a. $\frac{1}{4}$
 b. $\frac{3}{4}$
 c. $\frac{1}{3}$
 d. $\frac{1}{2}$
 e. $\frac{1}{2}\sqrt{3}$
10. Dua celah sempit yang terpisah pada jarak 0,2 mm disinari tegak lurus. Garis terang ketiga terletak 7,5 mm dari garis terang ke nol pada layar yang jaraknya 1 m dari celah. Panjang gelombang sinar yang dipakai adalah
 a. $2{,}5 \times 10^{-4}$ mm
 b. $5{,}0 \times 10^{-4}$ mm
 c. $1{,}5 \times 10^{-4}$ mm
 d. $2{,}5 \times 10^{-3}$ mm
 e. $5{,}0 \times 10^{-3}$ mm
11. Seberkas sinar monokromatis dengan panjang gelombang 5×10^{-7} m datang tegak lurus pada kisi. Jika spektrum orde kedua membuat sudut 30° dengan garis normal pada kisi maka jumlah garis per cm kisi adalah
 a. 2×10^3
 b. 4×10^3
 c. 5×10^3
 d. 2×10^4
 e. 5×10^4
12. Balok kaca akan menghasilkan sinar pantul terpolarisasi linear, jika sinar pantul dan sinar bias membentuk sudut
 a. 30°
 b. 45°
 c. 60°
 d. 90°
 e. 120°

13. Seberkas cahaya monokromatis dijatuhkan pada dua celah sempit vertikal berdekatan dengan jarak $d = 0{,}01$ mm. Pola interferensi yang terjadi ditangkap pada jarak 20 cm dari celah. Diketahui bahwa jarak antara garis gelap pertama di sebelah kiri ke garis gelap pertama di sebelah kanan adalah 7,2 mm. Panjang gelombang berkas cahaya adalah
 a. 180 nm
 b. 270 nm
 c. 360 nm
 d. 720 nm
 e. 1.800 nm

 (SPMB 2003 Regional I)

14. Suatu cahaya menerangi celah ganda yang memiliki jarak antarcelah 0,10 cm sedemikian hingga terbentuk pola gelap-terang pada layar yang berjarak 60 cm. Ketika pemisahan antarpola terang adalah 0,048 cm, maka panjang gelombang cahaya yang digunakan tersebut adalah
 a. 200 nm
 b. 300 nm
 c. 400 nm
 d. 600 nm
 e. 800 nm

 (UMPTN 2001 Rayon C)

15. Warna ungu dari spektrum orde ketiga berimpit dengan warna merah orde kedua dari suatu peristiwa difraksi yang mempergunakan kisi, ini berarti perbandingan antara sinar panjang gelombang sinar ungu dan sinar merah adalah
 a. 3 : 2
 b. 2 : 3
 c. 9 : 4
 d. 4 : 9
 e. semua jawaban salah

B. Jawablah pertanyaan berikut ini dengan tepat.

1. Dua celah dengan jarak 0,2 mm disinari tegak lurus. Garis terang ketiga terletak 7,5 mm dari garis terang ke nol pada layar yang berjarak 1 m dari celah. Berapa panjang gelombang sinar yang dipakai?
2. Cahaya suatu sumber melalui dua celah sempit yang terpisah 0,1 mm. Jika jarak antara dua celah sempit terhadap layar 100 cm dan jarak antara garis gelap pertama dan garis terang pertama adalah 2,95 mm, berapakah panjang gelombang cahaya yang digunakan?
3. Jika percobaan celah ganda Young dicelupkan ke dalam air, bagaimanakah perubahan pada interferensi yang terjadi?
4. Sebuah sacharimeter memiliki tabung yang diisi larutan gula, panjangnya 20 cm. Konsentrasi gula yang digunakan 10% dan sudut putar jenis larutan adalah $\alpha = 66{,}5\%$ per 10 cm. Jika digunakan sinar natrium, tentukan pemutaran bidang polarisasi cahaya oleh larutan.

Bab 3



Sumber: *Fundamental of Physics,* 2001

Kelelawar ladam kuda (*horseshoe bat*) dapat memancarkan gelombang bunyi ultrasonik yang berfungsi sebagai pengindra ketika terbang pada malam hari.

Gelombang Bunyi

Hasil yang harus Anda capai:

menerapkan konsep dan prinsip gejala gelombang dalam menyelesaikan masalah.

Setelah mempelajari bab ini, Anda harus mampu:

- mendeskripsikan gejala dan ciri-ciri gelombang bunyi;
- menerapkan konsep dan prinsip gelombang bunyi dalam teknologi.

Dapatkah Anda membayangkan dunia tanpa adanya bunyi? Dunia akan terasa sunyi tanpa adanya bunyi. Beragam jenis bunyi menjadikan dunia ini lebih "hidup". Anda dapat mendengarkan musik karena adanya perambatan gelombang bunyi yang sampai ke telinga Anda. Tahukah Anda sifat-sifat dan klasifikasi gelombang bunyi? Ultrasonik merupakan salah satu jenis bunyi yang dapat dipancarkan oleh kelelawar. Gelombang bunyi tersebut berperan sebagai "pengindra" ketika kelelawar terbang pada malam hari.

Selain ultrasonik, terdapat jenis gelombang bunyi lainnya. Untuk mengetahui lebih lanjut tentang jenis-jenis gelombang bunyi, sifat-sifat gelombang bunyi, dan fenomena-fenomena lainnya yang berkaitan dengan gelombang bunyi serta penerapannya dalam teknologi, pelajarilah materi pada bab ini secara baik.

A. Sifat Dasar Gelombang Bunyi

B. Cepat Rambat Bunyi

C. Unsur Bunyi dan Pemanfaatan Gelombang Bunyi

D. Sifat-Sifat Gelombang Bunyi

E. Dawai dan Pipa Organa sebagai Sumber Bunyi

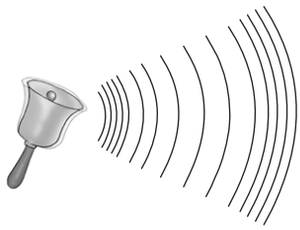
F. Energi Gelombang Bunyi

Tes Kompetensi Awal

Sebelum mempelajari konsep Gelombang Bunyi, kerjakanlah soal-soal berikut dalam buku latihan.

1. Berdasarkan sumbernya, bunyi termasuk jenis gelombang apa?
2. Apakah gelombang bunyi dapat mengalami polarisasi?
3. Apa yang dimaksud dengan audiosonik, infrasonik, dan ultrasonik?
4. Apa yang dimaksud dengan gema dan gaung?
5. Apakah gelombang yang dipancarkan pemancar radio termasuk gelombang longitudinal?

A. Sifat Dasar Gelombang Bunyi



Gambar 3.1
Gelombang bunyi dari lonceng yang bergetar merambat melalui media udara sampai ke telinga.

Apakah Anda mengetahui proses terjadinya bunyi? Pada dasarnya, sesuatu yang bergetar adalah sumber bunyi. Bunyi seekor nyamuk terdengar karena kepakan bulu-bulu kedua sayapnya yang memiliki frekuensi sekitar 500 Hz. Bunyi seekor jangkrik terdengar akibat adanya getaran kedua sayapnya yang bergesekan secara terus-menerus. Gelombang infrasonik dipancarkan oleh seekor paus dengan frekuensi sangat rendah di bawah 20 Hz, tetapi mampu ditangkap oleh paus yang lain walaupun jangkauannya ratusan kilometer.

Berbeda dengan sumber-sumber bunyi tersebut, bunyi pada alat-alat musik yang dapat kita dengar termasuk gelombang audiosonik. Bunyi yang keluar dari alat musik bersifat teratur sehingga dinamakan dengan nada. Adapun bunyi yang tidak teratur dinamakan desah.

Perhatikan **Gambar 3.1**. Pada gambar tersebut terlihat getaran lonceng menghasilkan gelombang bunyi yang merambat melalui media udara menuju telinga yang berupa gelombang longitudinal.

Pada dasarnya, gelombang bunyi dapat merambat di medium apapun. Perhatikan **Tabel 3.1**, kemampuan medium untuk menggetarkan partikel berbeda-beda bahkan ada medium yang dapat meredam bunyi, misalnya air.

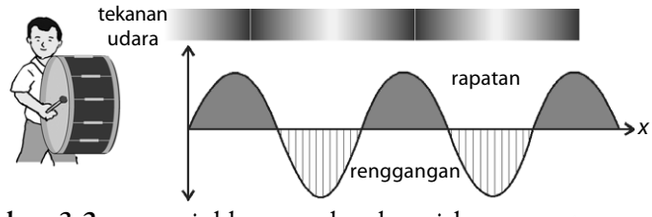
Tabel 3.1
Cepat Rambat Bunyi Beberapa Bahan pada Suhu 20 °C

Nama Bahan (Medium)	Cepat Rambat Bunyi (m/s)
Air	1.440
Air laut	1.560
Aluminium	5.100
Besi dan Baja	5.000
Gelas	4.500
Helium	1.005
Hidrogen	1.300
Kayu keras	4.000
Udara	343

Sumber: *Physics*, 1995

Gelombang bunyi dapat menunjukkan sifat-sifat umum gelombang, seperti dapat mengalami interferensi, difraksi, refraksi, dan resonansi. Anda juga akan mempelajari peristiwa superposisi, seperti superposisi dua gelombang bunyi yang kecil perbedaan frekuensinya sehingga menghasilkan bunyi kuat-lemah secara periodik yang disebut pelayangan bunyi.

Berdasarkan arah rambatnya, termasuk gelombang apakah bunyi itu? Agar Anda memahaminya, perhatikan **Gambar 3.2.**



Gambar 3.2
Getaran dari membran bas drum membuat partikel udara merapat dan merenggang.

Gambar 3.2 menunjukkan sumber bunyi berupa getaran membran bas drum. Getaran selaput yang merupakan denyut berdimensi dua dipantulkan secara berulang-ulang oleh batas selaput sehingga selaput akan bergetar secara periodik. Ketika selaput bergerak keluar, akan terjadi pemampatan udara di depannya. Pemampatan tersebut menyebabkan tekanan udara bertambah yang disebut daerah rapatan. Rapatan bergerak menjauhi selaput dalam batas kecepatan bunyi. Rapatan dan renggangan yang terbentuk dari partikel-partikel udara mirip dengan rapatan dan renggangan gelombang longitudinal pada slinki. Jadi gelombang longitudinal merupakan sifat dasar gelombang bunyi.

Bunyi dapat terdengar jika getaran dari sumbernya dapat merambat hingga ke telinga. Media rambatannya dapat berupa zat padat, zat cair, dan zat gas. Jadi, diperlukan medium untuk menjalarkan bunyi. Masih ingatkah Anda peristiwa tentang bunyi yang dapat merambat melalui seutas benang basah yang kedua ujungnya terhubung kaleng susu dengan bantuan suara teman Anda? Nah, menurut Anda dapatkah bunyi merambat di dalam vakum? Untuk mengetahui jawabannya, lakukanlah aktivitas berikut.

Ingatlah

Gelombang longitudinal adalah gelombang yang arah getarnya searah dengan arah rambatannya

Aktivitas Fisika 3.1

Bunyi dalam Ruang Vakum

Tujuan Percobaan

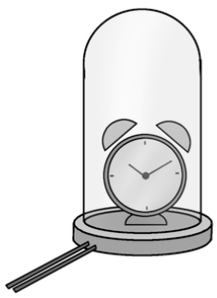
Menyelidiki apakah bunyi dapat merambat melalui ruang hampa.

Alat-Alat Percobaan

1. Jam weker
2. Tabung hampa udara (vakum)

Langkah-Langkah Percobaan

1. Bunyikan jam weker tanpa ditutup oleh tabung vakum.
2. Tutup jam weker dengan tabung vakum. Amati yang terdengar dari jam weker tersebut.
3. Gunakan sebuah pengisap untuk mengisap udara dalam tabung vakum secara perlahan-lahan.
4. Amati perubahan intensitas bunyi jam weker tersebut.



Apa yang dapat Anda simpulkan dari aktivitas tersebut? Mengapa ketika udara di dalam tabung diisap, lama-kelamaan bunyi jam weker tersebut tidak terdengar? Hal tersebut membuktikan bahwa gelombang bunyi memerlukan medium untuk merambat.

Tugas Anda 3.1

Apakah bunyi termasuk gelombang elektromagnetik? Sebutkan alasan-alasan yang mendasari jawaban Anda tersebut.

Kata Kunci

- gelombang bunyi
- gelombang longitudinal
- gelombang infrasonik
- gelombang audiosonik
- nada
- desah
- pelayangan bunyi
- ruang vakum

Tes Kompetensi Subbab A

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Apakah yang dimaksud dengan sumber bunyi?
2. Sebutkan sifat-sifat yang dimiliki gelombang bunyi?
3. Apakah bunyi dapat merambat di ruang hampa udara? Mengapa?
4. Berdasarkan arah getarnya, termasuk gelombang apakah bunyi itu?
5. Apakah perbedaan antara nada dan desah?

B. Cepat Rambat Bunyi

Cepat rambat bunyi tidak bergantung pada tekanan udara. Jadi, jika terjadi perubahan tekanan udara, cepat rambat bunyi tidak berubah. Cepat rambat bunyi bergantung pada suhu. Semakin tinggi suhu udara, semakin besar cepat perambatan bunyi. Di daerah pegunungan, cepat rambat bunyi lebih lambat daripada cepat rambat bunyi di kawasan pantai. Di udara, cepat rambat bunyi bergantung pada jenis partikel yang membentuk udara tersebut. Persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut.

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \qquad (3\text{–}1)$$

Ingatlah

Cepat rambat bunyi di udara bergantung pada suhu udara.

Keterangan:
γ = konstanta Laplace
R = tetapan umum gas (8,31 J/mol K)
T = suhu mutlak gas (kelvin)
M = massa molekul gas (gram/mol)

Cepat rambat bunyi dalam zat padat ditentukan oleh modulus Young dan massa jenis zat tersebut. Persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad (3\text{–}2)$$

Keterangan:
E = modulus Young zat padat (N/m^2)
ρ = massa jenis zat padat (kg/m^3)

Di dalam zat cair, cepat rambat bunyi ditentukan oleh modulus Bulk dan kerapatan (massa jenis) cairan tersebut. Persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut.

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \qquad (3\text{–}3)$$

Keterangan:
B = modulus Bulk (N/m^2)
ρ = massa jenis zat cair (kg/m^3)

Tugas Anda 3.2

Bandingkan nilai cepat rambat bunyi di udara yang Anda dapatkan dari percobaan dan dari buku referensi. Jika ada perbedaan, berikan analisis Anda mengenai hal tersebut.

Contoh 3.1

Bandingkan kecepatan bunyi dalam aluminium dan air jika modulus Young untuk aluminium = $7{,}0 \times 10^{10}$ N/m^2, modulus Bulk air = $2{,}1 \times 10^9$ N/m^2, dan kecepatan air = 1.000 kg/m^3.

Jawab:

Diketahui: $E = 7{,}0 \times 10^{10}$ N/m^2; $\rho_{al} = 2.700$ kg/m^3;
$B = 2{,}1 \times 10^{10}$ N/m^2; $\rho_{air} = 1.000$ kg/m^3.

$$v_{al} = \sqrt{\frac{E}{\rho_{al}}} = \sqrt{\frac{7{,}0\times10^{10}\ \text{N/m}^2}{2.700\ \text{kg/m}^3}} = 5.092\ \text{m/s}$$

$$v_{air} = \sqrt{\frac{B}{\rho_{air}}} = \sqrt{\frac{2{,}1\times10^{9}\ \text{N/m}^2}{1.000\ \text{kg/m}^3}} = 1.449\ \text{m/s}$$

Kecepatan bunyi di air ternyata lebih kecil daripada kecepatan bunyi dalam aluminium. Hal tersebut disebabkan cairan lebih kompresibel (lebih mudah berubah bentuk) dibandingkan dengan zat padat (modulus Bulk cairan lebih kecil dibandingkan dengan modulus Young untuk zat padat).

Pembahasan Soal

Iskandar mendengarkan kembali suaranya sebagai gema dari sebuah tebing setelah waktu 4 detik. Jika γ adalah perbandingan panas jenis udara pada tekanan dan suhu konstan, serta Iskandar mengetahui bahwa suhu saat itu T kelvin dan massa molekul relatif udara M, Iskandar dapat menentukan jarak tebing menurut persamaan

a. $\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$
b. $2\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$
c. $4\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$
d. $6\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$
e. $8\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$

UMPTN 1996

Pembahasan:

$$d = \frac{vt}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

$$d = \frac{\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \times t}{2} = \frac{\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \times 4}{2}$$

$$= 2\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

Jawaban: b

Contoh 3.2

Cepat rambat gelombang bunyi di udara pada suhu 20°C adalah 340 m/s. Jika suhu udara naik menjadi 37°C, tentukan cepat rambat gelombang bunyi tersebut.

Jawab:

Ketika suhu udara naik, kecepatan bunyi akan semakin bertambah. Hal tersebut disebabkan gerakan-gerakan molekul udara yang merambatkan bunyi bertambah cepat.

Diketahui: $T_1 = 20 + 273 = 293$ K;
$T_2 = 37 + 273 = 310$ K;
$v_1 = 340$ m/s

$$\frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{\gamma RT_2}{M}} : \sqrt{\frac{\gamma RT_1}{M}}$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}\, v_1 = \sqrt{\frac{310}{293}} \cdot 340 = 349{,}72 \text{ m/s}$$

Jadi, cepat rambat bunyi bertambah menjadi 349,72 m/s.

Kata Kunci

- cepat rambat bunyi
- konstanta Laplace
- modulus Young
- modulus Bulk

Tes Kompetensi Subbab B

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Tentukan kecepatan bunyi dalam gas karbon dioksida pada suhu 400° C, jika berat molekul CO_2 44 dan $\gamma = 1{,}3$.
2. Cepat rambat bunyi pada suhu 15°C sama dengan 241 m/s. Tentukan cepat rambat bunyi pada suhu 100° C.
3. Cepat rambat bunyi dalam gas CO_2 adalah 400 m/s ($\gamma = 1{,}3$). Berapakah cepat rambatnya dalam gas O_2 ($\gamma = 1{,}4$) pada suhu yang sama?
4. Hitung cepat rambat bunyi pada sebatang besi. ($E = 1{,}9 \times 10^{11}$ N/m^2 dan $\rho = 7{,}8$ gram/cm^3)
5. Berapa kali lipatkah kecepatan bunyi pada baja dibandingkan dengan kecepatan bunyi pada aluminium, jika modulus Young untuk baja dan aluminium masing-masing 2×10^{11} N/m^2 dan 7×10^{10} N/m^2, serta massa jenis baja dan aluminium masing-masing 8 gram/cm^3 dan 2,6 gram/cm^3?

C. Unsur Bunyi dan Pemanfaatan Gelombang Bunyi

Unsur-unsur bunyi antara lain sebagai berikut.

1. Tinggi Nada Bunyi

Pada pokok bahasan sebelumnya, Anda telah mengetahui bahwa bunyi ditimbulkan oleh suatu benda yang bergetar. Semakin banyak jumlah getaran yang dihasilkan dalam satu selang waktu tertentu, bunyi yang dihasilkan akan semakin nyaring.

Pada gambar **Gambar 3.3**, seorang anak terlihat sedang menempelkan batang lidi di jari-jari roda sepeda yang sedang berputar. Jika roda tersebut diputar semakin cepat, apakah bunyi yang dihasilkan akan semakin nyaring?



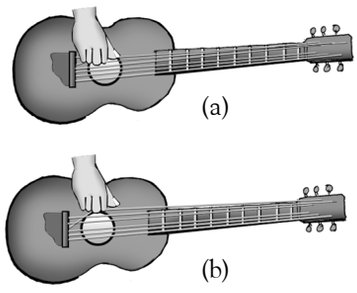
Gambar 3.3
Lidi dipegang oleh seorang anak dan ditempelkan pada jeruji roda yang berputar.

Ternyata pada putaran yang lambat, bunyi yang terdengar bernada rendah. Pada saat putaran roda sepeda dipercepat, bunyi yang terdengar bernada tinggi. Hal tersebut membuktikan bahwa tinggi nada bergantung pada frekuensi sumber bunyi.

2. Kuat Bunyi

Kuat bunyi yang dihasilkan bergantung pada amplitudo getaran. Perhatikan **Gambar 3.4** yang menerangkan percobaan pada senar gitar.

Petiklah salah satu senar gitar dengan simpangan yang tidak terlalu besar. Dengarkan baik-baik kuat bunyi yang dihasilkan, lalu bandingkan dengan kuat bunyi yang dihasilkan oleh senar yang sama, namun dengan simpangan yang lebih besar daripada semula. Petikan manakah yang menghasilkan bunyi lebih kuat?



Gambar 3.4
Percobaan kuat bunyi yang dihasilkan oleh getaran senar gitar dengan (a) simpangan yang kecil dan (b) simpangan yang besar.

3. Warna Bunyi

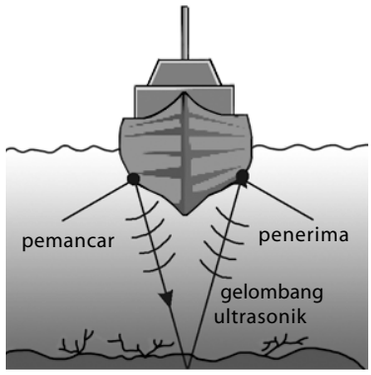
Warna bunyi merupakan bunyi khas yang ditimbulkan oleh suatu sumber bunyi. Bunyi gitar berbeda dengan bunyi biola, itu karena ada warna bunyi. Perbedaan tersebut terjadi karena gabungan nada atas dan nada dasar dari sumber bunyi berbeda-beda walaupun frekuensinya sama.

4. Batas Pendengaran

Anda tentu telah mengetahui bahwa manusia dan hewan dilengkapi dengan alat pendengaran yang sempurna. Namun, kemampuan pendengarannya berbeda-beda. Batas kemampuan pendengaran diukur berdasarkan frekuensi bunyi.

Manusia normal memiliki batas pendengaran antara 20 hertz sampai dengan 20.000 hertz. Daerah frekuensi tersebut dinamakan *frekuensi audio*, sedangkan daerah frekuensi di bawah 20 hertz disebut *infrasonik*, dan daerah di atas frekuensi dengar atau di atas 20.000 hertz disebut *ultrasonik*.

Beberapa hewan mampu mendengar bunyi ultrasonik, bahkan hewan seperti kelelawar yang memiliki alat penglihatan tidak sebaik alat pendengarannya, menggunakan bunyi ultrasonik untuk mengetahui benda yang ada di depannya.



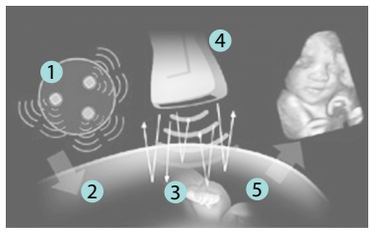
Gambar 3.5
Sonar dapat digunakan untuk mendeteksi kedalaman laut.

5. Pemanfaatan Gelombang Bunyi

Gelombang bunyi banyak dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari, misalnya untuk menentukan kedalaman laut, mencari sumber minyak, dan mendeteksi kerusakan logam. Untuk menentukan kedalaman laut, alat pendeteksi yang digunakan disebut *sonar* (*sound navigation ranging*). Sonar bekerja dengan memancarkan gelombang, kemudian pantulan gelombang tersebut akan diterima oleh *receiver*. Dengan mengetahui kecepatan gelombang yang diukur dan waktu tempuh gelombang tersebut. Kedalaman laut dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$s = v\left(\frac{1}{2}t\right) \qquad (3\text{–}4)$$

Faktor setengah di depan t pada **Persamaan (3–4)** menyatakan setengah waktu tempuh dari sonar ke tempat pemantulan.

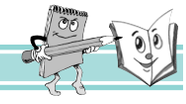


Sumber: *www.mediajakartaselatan.com*

Gambar 3.6
Teknologi 3D USG terbaru sekarang dapat melihat organ-organ tubuh bayi dalam kandungan.

Frekuensi yang digunakan oleh sonar berada pada daerah ultrasonik, yaitu di atas 20.000 hertz. Frekuensi tersebut tidak dapat didengar dan panjang gelombang pada daerah ultrasonik sangat kecil sehingga difraksi yang terjadi juga semakin kecil dan gelombang tidak akan menyebar. Kecilnya panjang gelombang yang digunakan, dapat juga digunakan untuk mendeteksi benda-benda yang kecil. Penggunaan gelombang ultrasonik terdapat juga pada alat *ultrasonografi* (USG). Alat tersebut umumnya digunakan untuk menganalisis kehamilan atau mendeteksi organ-organ dalam tubuh.

Contoh 3.3



Sebuah alat sonar digunakan untuk mengukur kedalaman laut. Selang waktu yang dicatat oleh sonar untuk gelombang perambatan sampai kembali lagi ke sonar adalah 1 sekon. Jika cepat rambat gelombang di dalam air laut adalah 1.500 m/s, tentukanlah kedalaman laut tersebut.

Jawab:
Diketahui: $v = 1.500$ m/s; $t = 1$ s.

$s = v\,(\frac{1}{2}\,t) = 1.500 \text{ m/s} \times \frac{1}{2} \times 1 \text{ s} = 750$ meter.

Jadi, laut tersebut memiliki kedalaman 750 meter.

Kata Kunci

- tinggi nada
- kuat bunyi
- *audiosonik*
- *infrasonik*
- *ultrasonik*
- resonansi
- *sonar*
- *ultrasonografi*

Tes Kompetensi Subbab C

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Anda mendengar halilintar 12 sekon setelah kilat terlihat. Jika cepat rambat bunyi di udara = 340 m/s, tentukan jarak asal kilat tersebut dari tempat Anda.
2. Sebuah alat sonar digunakan untuk mengukur kedalaman laut. Selang waktu yang dicatat oleh sonar untuk gelombang merambat sampai kembali ke sonar adalah 1,6 sekon. Jika kedalaman laut 2.400 m, tentukan cepat rambat bunyi di dalam air laut.
3. Mengapa kelelawar yang terbang pada malam hari tidak pernah menabrak benda-benda yang ada di dekatnya?
4. Jika tinggi nada dinaikkan, bagaimanakah perubahan yang terjadi pada:
 a. frekuensi;
 b. panjang gelombang;
 c. cepat rambat gelombang;
 d. amplitudo gelombang.
5. Jika kuat bunyi dinaikkan, bagaimanakah perubahan yang terjadi pada:
 a. frekuensi;
 b. panjang gelombang;
 c. cepat rambat gelombang;
 d. amplitudo gelombang.

D. Sifat-Sifat Gelombang Bunyi

Anda telah mempelajari sifat-sifat umum tentang gelombang, yaitu pembiasan (refraksi), pemantulan (refleksi), pelenturan (difraksi), interferensi, dan polarisasi. Bunyi merupakan salah satu bentuk gelombang. Oleh karena itu, gelombang bunyi juga mengalami peristiwa-peristiwa tersebut.

1. Pemantulan Gelombang Bunyi

Mengapa saat Anda berteriak di sekitar tebing selalu ada bunyi yang menirukan suara Anda tersebut? Mengapa suara Anda terdengar lebih keras ketika berada di dalam gedung? Kedua peristiwa tersebut menunjukkan bahwa bunyi dapat dipantulkan. Untuk memahami tentang pemantulan bunyi, lakukanlah aktivitas berikut.

Aktivitas Fisika 3.2

Pemantulan Bunyi

Tujuan percobaan

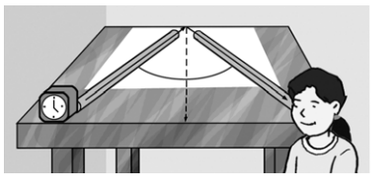
Membuktikan peristiwa pemantulan bunyi.

Alat-Alat Percobaan

1. Weker
2. Papan pemantul
3. Meja
4. Dua buah pipa berdiameter 1 inci
5. Busur derajat
6. Kertas karton putih

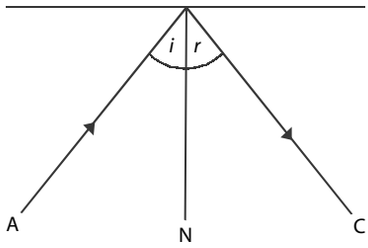
Langkah-Langkah Percobaan

1. Susunlah alat seperti tampak pada gambar.
2. Letakkan jam weker di salah satu ujung pipa paralon.
3. Atur pipa paralon yang lain agar Anda dapat mendengar bunyi jam weker yang paling jelas.
4. Gambarlah susunan pipa tersebut pada kertas karton putih yang Anda letakkan di bawahnya. Ukurlah besar sudut datang dan sudut pantulnya.
5. Ulangi langkah percobaan ke-3 dan ke-4 dengan sudut yang berbeda.



Tugas Anda 3.3

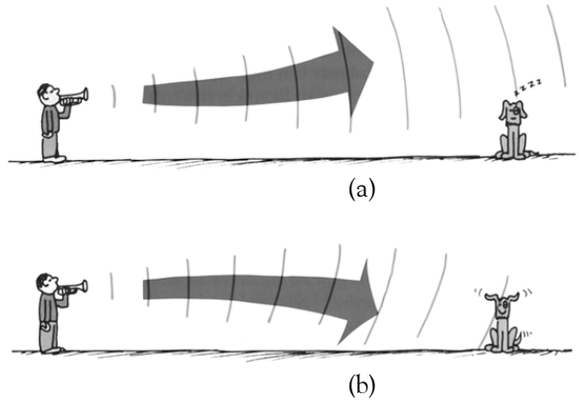
Gelombang bunyi merupakan gelombang longitudinal sehingga tidak dapat mengalami dispersi dan polarisasi. **Diskusikanlah** bersama teman Anda, mengapa hal tersebut bisa terjadi? Berikanlah penjelasan ilmiah mengenai hal tersebut.



Gambar 3.7
Proses pemantulan bunyi.

Lukisan garis yang Anda buat tentang sudut datang, sudut pantul, dan garis normal pada pemantulan bunyi akan sama dengan **Gambar 3.7**. Pada gambar tersebut terlihat bahwa sudut datang (i), sudut pantul (r), dan garis normal terletak pada satu bidang datar, dan $i = r$.

Mengapa bunyi dalam ruangan tertutup terdengar lebih keras? Letak dinding ruangan yang terlalu dekat menyebabkan bunyi pantul tidak cukup waktu untuk merambat sehingga bunyi datang dan bunyi pantul terdengar secara bersamaan. Hal tersebut membuktikan bahwa bunyi pantul dapat memperkuat bunyi aslinya. Itulah sebabnya suara musik akan terdengar lebih keras di dalam ruangan daripada di lapangan terbuka. Berbeda dengan gema yang terjadi jika Anda berteriak di daerah bertebing. Jarak tebing dan sumber bunyi yang cukup jauh menyebabkan bunyi pantul memerlukan waktu yang cukup lama untuk merambat sampai pendengaran. Akibatnya, bunyi pantul akan terdengar setelah bunyi asli. Beberapa peristiwa tersebut merupakan pengalaman yang sering Anda temukan.



Gambar 3.8
(a) Pada siang hari, arah rambat bunyi melengkung ke atas.
(b) Pada malam hari, arah rambat bunyi melengkung ke bawah.

2. Pembiasan Gelombang Bunyi

Anda telah mengetahui gelombang bunyi merambat ke semua arah dan gelombang bunyi tidak dapat terpolarisasi. Mengapa pada malam hari suara adzan atau suara teriakan yang cukup jauh terdengar lebih jelas daripada siang hari? Pada siang hari, suhu udara di permukaan lebih tinggi daripada di atasnya. Hal tersebut menyebabkan lapisan udara pada bagian atas lebih rapat daripada di bawahnya. Sebaliknya, pada malam hari lapisan udara di permukaan lebih rapat daripada di atasnya. Akibatnya, pada siang hari jika sumber bunyi datang secara horizontal terhadap pendengar, dapat dipastikan arah rambat bunyi akan melengkung ke atas, sedangkan pada malam hari arah rambat bunyi akan melengkung ke bawah. Perhatikan **Gambar 3.8**.

Apa yang akan terjadi jika bunyi datangnya merambat vertikal ke bawah? Pada malam hari, arah rambat bunyi dibiaskan mendekati garis normal. Sebaliknya, pada siang hari arah rambat bunyi dibiaskan menjauhi garis normal.

Sesuai dengan hukum pembiasan gelombang bahwa gelombang datang dari medium kurang rapat ke medium lebih rapat akan dibiaskan mendekati garis normal atau sebaliknya.

3. Difraksi Gelombang Bunyi

Apakah gelombang bunyi dapat mengalami difraksi atau pelenturan? Peristiwa pelenturan bunyi dapat diamati ketika Anda mendengar deru bunyi mobil melintasi daerah perbukitan yang berkelok, suara percakapan teman-teman Anda di ruangan yang berbeda, atau kaca pembatas loket pembayaran di sebuah bank yang sengaja dibuat dengan beberapa lubang kecil agar gelombang bunyi tidak memantul, walaupun arah rambat bunyi tidak berupa garis lurus. Tiga peristiwa tersebut merupakan contoh penerapan difraksi bunyi. Jadi, apakah yang dimaksud dengan difraksi itu? Difraksi adalah peristiwa pelenturan gelombang ketika melewati celah, yang ukuran celahnya se-orde dengan panjang gelombangnya.

Ingatlah

Pelayangan bunyi terjadi karena adanya interferensi dua gelombang yang frekuensinya berbeda sedikit.

Lalu, mengapa gelombang bunyi mudah mengalami difraksi? Gelombang bunyi di udara memiliki panjang gelombang sekitar beberapa sentimeter sampai beberapa meter. Bandingkan dengan cahaya yang memiliki panjang gelombang berkisar 500 mm. Itulah sebabnya gelombang bunyi lebih mudah untuk terdifraksi.

Kata Kunci

- dispersi
- refraksi
- refleksi
- difraksi
- interferensi
- polarisasi
- superposisi

4. Interferensi Gelombang Bunyi

Ketika Anda berdiri di depan dua *loudspeaker* (pengeras suara) sebagai sumber bunyi, kemudian berjalan lurus sejajar dengan garis penghubung kedua *loudspeaker* tersebut. Tak lama setelah itu, Anda akan mendengar bunyi lemah dan sesaat kemudian terdengar bunyi kuat. Bunyi kuat terjadi ketika superposisi dari dua gelombang bunyi menghasilkan interferensi destruktif. Interferensi tersebut terjadi jika beda lintasannya merupakan kelipatan bilangan bulat dari setengah panjang gelombang bunyi, secara matematis dituliskan sebagai berikut.

$$\Delta s = \frac{(n+1)\lambda}{2};\ \text{dengan } n = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

$n = 0$, $n = 1$, dan $n = 2$ berturut-turut untuk bunyi kuat pertama, bunyi kuat kedua, dan bunyi kuat ketiga.

5. Pelayangan Bunyi

Interferensi yang ditimbulkan dari dua gelombang bunyi dapat menyebabkan peristiwa pelayangan bunyi, yaitu penguatan dan pelemahan bunyi. Hal tersebut terjadi akibat superposisi dua gelombang yang memiliki frekuensi yang sedikit berbeda dan merambat dalam arah yang sama. Jadi, satu pelayangan didefinisikan sebagai dua bunyi keras atau dua bunyi lemah yang terjadi secara berurutan. (layangan = kuat – lemah – kuat atau lemah – kuat – lemah).

Jika kedua gelombang bunyi tersebut merambat bersamaan, akan menghasilkan bunyi paling kuat saat fase keduanya sama. Jika kedua getaran berlawanan fase, akan dihasilkan bunyi paling lemah.

Misalkan dua sumber bunyi memiliki frekuensi f_1 dan f_2 sedikit berbeda, simpangan setiap gelombang pada posisi tertentu adalah

$$y_1 = A \sin 2\pi f_1 t \text{ dan } y_2 = A \sin 2\pi f_2 t$$

Dengan demikian superposisi simpangan kedua gelombang tersebut adalah

$$y = y_1 + y_2 = A \sin 2\pi f_1 t + A \sin 2\pi f_2 t$$
$$y = A\left(\sin 2\pi f_1 t + \sin 2\pi f_2 t\right)$$

dengan menggunakan aturan sinus akan diperoleh

$$y = 2A\cos\frac{1}{2}(2\pi f_1 t - 2\pi f_2 t)\sin\frac{1}{2}(2\pi f_1 t + 2\pi f_2 t)$$
$$= 2A\cos 2\pi t\left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right)\ \sin 2\pi t\left(\frac{f_1 + f_2}{2}\right)$$

Jika $f_1 = f_2 + \Delta f$ dan $f_2 = f_1 = f$ maka

$$\left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right) = \frac{\Delta f}{2} \text{ dan } \left(\frac{f_1 + f_2}{2}\right) = \frac{2f + \Delta f}{2} = f$$

Persamaan superposisi dapat dituliskan menjadi

$$y = 2A \cos 2\pi ft \left(\frac{\Delta f}{2}\right) \sin 2\pi ft = A_p \sin 2\pi ft \qquad (3\text{–}7)$$

Ingatlah

$\sin A + \sin B = 2 \cos \frac{1}{2} (A–B) \sin \frac{1}{2} (A+B)$

Pembahasan Soal

Dua buah dawai baja yang identik memberikan nada dasar dengan frekuensi 400 Hz. Bila tegangan dalam salah satu dawai ditambah 2%, frekuensi pelayangan yang terjadi adalah

a. 0 Hz
b. 2 Hz
c. 4 Hz
d. 6 Hz
e. 8 Hz

Tes ITB 1975

Pembahasan:
Diketahui:
$f_0 = 400$ Hz
Tegangan ditambah 2%
$p' = F + 2\% F = 1{,}02 F$
maka

$$\frac{f_0}{f} = \sqrt{\frac{F'}{F}} = \sqrt{\frac{1{,}02F}{F}} = 1{,}01$$

sehingga frekuensi layangannya adalah

$$f_p = (f_2 - f_1)$$
$$= (1{,}01\, f_0 - f_0)$$
$$= 0{,}01\, f_0$$
$$= 0{,}01 \cdot 400 \text{ Hz}$$
$$= 4 \text{ Hz}$$

Jawaban: c

$$A_p = 2A\cos 2\pi\left(\frac{\Delta f}{2}\right) t \qquad (3\text{–}8)$$

Berdasarkan **Persamaan (3–7)**, intensitas bunyi akan maksimal jika $y = \pm 2A$. Oleh karena itu, layangan bunyi terjadi jika $2A\cos 2\pi(\frac{\Delta f}{2})t$ bernilai 1 dan –1 sehingga frekuensi layangannya adalah

$$f_p = (f_1 - f_2) \qquad (3\text{–}9)$$

Keterangan:
f_p = frekuensi pelayangan (Hz)
f_2 = frekuensi gelombang y_2 (Hz)
f_1 = frekuensi gelombang y_1 (Hz)

Contoh 3.4

Dua utas senar yang identik memberikan nada dasar dengan frekuensi 200 Hz. Jika tegangan salah satu senar ditambah 4%, berapa pelayangan yang terjadi?

Jawab:
Diketahui: $f_1 = 200$ Hz; $F_1 = F$; $F_2 = 104\% F = 1{,}04F$.

f_2 dapat dihitung dengan persamaan $f = \frac{1}{2\ell}\sqrt{\frac{F}{\mu}}$

$$\frac{f_2}{f_1} = \sqrt{\frac{F_2}{F_1}} = \sqrt{\frac{1{,}04F}{F}} = 1{,}02$$

$$f_2 = 1{,}02\, f_1 = 1{,}02(200\text{Hz}) = 204 \text{ Hz}$$

Frekuensi pelayangan diperoleh dengan menggunakan **Persamaan (3–9)** adalah
$f_p = (f_1 - f_2) = (200 - 204)$ Hz $= -4$ Hz
Jadi, frekuensi pelayangannya adalah –4 Hz.

Tes Kompetensi Subbab D

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Jelaskan pengertian difraksi gelombang bunyi.
2. Jika ada tiga sumber bunyi yang identik diletakkan masing-masing berjarak 1 m dengan yang lainnya, kapankah terjadi interferensi maksimum dari ketiga sumber bunyi tersebut?
3. Dua buah senar yang identik memberikan nada dasar dengan frekuensi 300 Hz. Jika tegangan salah satu dawai ditambah 5%, berapa frekuensi pelayangan yang terjadi?

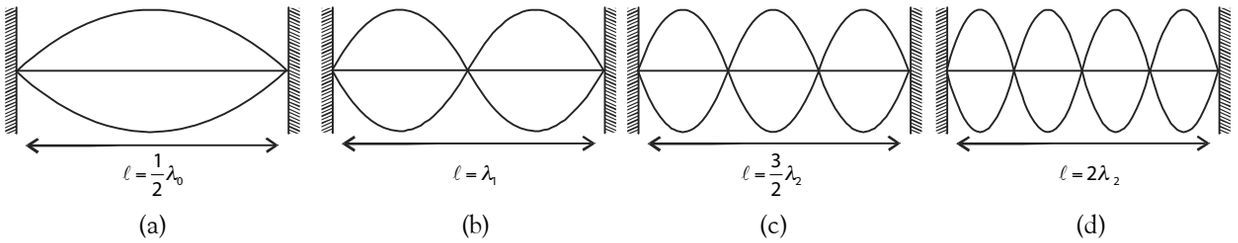
E. Dawai dan Pipa Organa sebagai Sumber Bunyi

1. Frekuensi Gelombang pada Dawai

Anda telah mempelajari bahwa benda-benda yang bergetar merupakan sumber bunyi, tetapi tidak semua bunyi dapat didengar oleh telinga manusia. Hal tersebut disebabkan telinga manusia normal memiliki frekuensi ambang minimal, yaitu frekuensi terendah dari sumber bunyi yang masih dapat diterima oleh telinga.

Salah satu sumber bunyi adalah dawai gitar. Nada yang dihasilkan dawai gitar dapat diubah-ubah dengan cara menekan senar pada titik-titik tertentu. Pola gelombang yang dapat terjadi pada dawai gitar ditunjukkan pada **Gambar 3.9** dengan ℓ berubah-ubah.

Satu dawai dapat membentuk berbagai frekuensi atau pola getaran, seperti tampak pada **Gambar 3.9**.



Gambar 3.9
(a) Nada dasar f_0;
(b) Nada atas pertama f_1;
(c) Nada atas kedua f_2;
(d) Nada atas ketiga f_3.

Pola getaran dawai pada **Gambar 3.9(a)** menghasilkan nada dasar (f_0) dengan $\ell = \frac{1}{2}\lambda_0$ atau $\lambda_0 = 2\ell$, maka $f_0 = \frac{v}{\lambda_0} = \frac{v}{2\ell}$.

Pola getaran dawai pada **Gambar 3.9(b)** menghasilkan nada atas pertama (f_1) dengan $\ell = \lambda_1$ atau $\lambda_1 = \ell$, maka $f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{\ell} = 2f_0$.

Pola getaran dawai pada **Gambar 3.9(c)** menghasilkan nada atas kedua (f_2) dengan $\ell = \frac{3}{2}\lambda_2$ atau $\lambda_2 = \frac{2}{3}\ell$, maka $f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{v}{\frac{2}{3}\ell} = \frac{3v}{2\ell} = 3f_0$.

Pola getaran dawai pada **Gambar 3.9(d)** menghasilkan nada atas ketiga (f_3) dengan $\ell = 2\lambda_3$ atau $\lambda_3 = \frac{1}{2}\ell$, maka $f_3 = \frac{v}{\lambda 3} = \frac{v}{\frac{1}{2}\ell} = \frac{4v}{2\ell} = 4f_0$.

Perbandingan frekuensi nada-nada pada dawai yang dihasilkan berupa pola gelombang seperti pada **Gambar 3.9** adalah sebagai berikut.

$$f_0 : f_1 : f_2 : \ldots = 1 : 2 : 3 : \ldots \qquad (3\text{–}7)$$

Oleh karena cepat rambat gelombang pada dawai sesuai dengan hasil **percobaan Melde**, yaitu $v = \sqrt{\frac{F\ell}{m}}$ maka diperoleh

a) frekuensi nada dasar,

$$f_0 = \frac{1}{2\ell}\sqrt{\frac{F}{\mu}} = \frac{1}{2\ell}\sqrt{\frac{F\ell}{m}}$$

b) frekuensi nada atas pertama,

$$f_1 = \frac{1}{\ell}\sqrt{\frac{F}{\mu}} = \frac{1}{\ell}\sqrt{\frac{F\ell}{m}}$$

c) frekuensi nada atas kedua,

$$f_2 = \frac{3}{2\ell}\sqrt{\frac{F}{\mu}} = \frac{3}{2\ell}\sqrt{\frac{F\ell}{m}}$$

d) frekuensi nada atas ke-n,

$$f_n = (n+1)f_0 = \left(\frac{n+1}{2\ell}\right)\sqrt{\frac{F}{\mu}} \qquad (3\text{–}8)$$



Informasi untuk Anda



Echolocation adalah bentuk sensor yang digunakan oleh binatang seperti kelelawar, paus, dan lumba-lumba. Binatang tersebut memancarkan gelombang suara (gelombang longitudinal), kemudian dipantulkan oleh objek. Gelombang pantul kemudian dideteksi oleh binatang tersebut. Gelombang echolocation yang dipancarkan oleh kelelawar memiliki frekuensi sekitar 175.000 Hz.

Information for You

Echolocation *is a form of sensory perception used by animals such as bats, toothed whales, and porpoises. The animal emits a pulse of sound (a longitudinal wave) which is reflected from objects. The reflected pulse is detected by the animal. Echolocation wave emitted by bats have frequencies of about 175.000 Hz.*

Persamaan frekuensi nada-nada tersebut, kali pertama diungkapkan oleh **Mersenne** sehingga **Persamaan (3–8)** tersebut dikenal dengan **Hukum Mersenne**.

Contoh 3.5

Seutas dawai yang kedua ujungnya terikat memiliki panjang 2 m, massa jenisnya (ρ) = 50 g/cm^3 menghasilkan frekuensi nada dasar (f_0) = 60 Hz.

a. Hitunglah gaya tegangan dawai.
b. Berapakah besar frekuensi dan panjang gelombang pada nada atas pertama?
c. Tentukanlah frekuensi dan panjang gelombang pada dawai untuk nada atas kedua.

Jawab:

Diketahui: $\ell = 2$ m; $\rho = 50$ kg/cm^3; $f_0 = 60$ Hz.

a. Dengan menggunakan **Persamaan (3–8)** untuk nada dasar, diperoleh

$$f_0 = \frac{1}{2\ell}\sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad \text{atau} \quad F = 4\mu\ell^2 f_0^2$$

$F = (4)(50 \times 10^{-3}\ \text{kg/cm}^3)(2)^2(60\ \text{Hz})^2$

$F = 2.880$ N

Jadi, besar gaya tegangan dawai adalah 2.880 N.

b. Frekuensi nada atas pertama (n=1) adalah

$f_n = (n + 1)f_0$ atau $f_1 = 2f_0 = 2(60\ \text{Hz}) = 120$ Hz.

Panjang gelombang pada nada atas pertama adalah $\lambda = \ell = 2$ m.

c. Frekuensi pada nada atas kedua ($n = 2$) adalah

$f_n = (n + 1)f_0$ atau $f_2 = 3f_0 = 3(60\ \text{Hz}) = 180$ Hz.

Panjang gelombang pada nada atas kedua adalah

$$\ell = \frac{3}{2}\lambda_2 \quad \text{atau} \quad \lambda_2 = \frac{2}{3}\ell = \left(\frac{2}{3}\right)(2) = \frac{4}{3} = 1,33\ \text{m}.$$

2. Pipa Organa dan Pola Gelombangnya



Gambar 3.10
Seruling merupakan pipa organa terbuka.

Telah Anda ketahui bahwa benda yang bergetar dapat menghasilkan bunyi. Tidak hanya benda padat, seperti dawai, tali, maupun pelat logam yang dapat bergetar, getaran pun dapat terjadi pada gas, misalnya udara. Getaran kolom udara pada seruling akan menghasilkan bunyi. Tinggi nada yang diperoleh dari sebuah seruling dapat diatur frekuensinya. Di antara perangkat musik sederhana yang dapat menghasilkan getaran kolom udara selain seruling adalah pipa organa. Terdapat dua macam pipa organa, yaitu pipa organa terbuka dan pipa organa tertutup.

a. Pipa Organa Terbuka

Pipa organa terbuka adalah alat tiup berupa tabung yang kedua ujung penampangnya terbuka. Kedua ujung pipa organa terbuka menjadi perut gelombang pada kolom udara. Pola gelombang yang dihasilkan seperti tampak pada **Gambar 3.11**. Frekuensi yang dihasilkan oleh pipa organa terbuka adalah sebagai berikut.

1) Nada dasar (f_0): $\ell = \frac{1}{2}\lambda_0$ atau $\lambda_0 = 2\ell$.

Frekuensi yang dihasilkan, $f_0 = \frac{v}{\lambda_0} = \frac{v}{2\ell}$.

2) Nada atas pertama (f_1): $\ell = \lambda_1$ atau $\lambda_1 = \ell$.

Frekuensi yang dihasilkan, $f_1 = \dfrac{v}{\lambda_1} = \dfrac{v}{\ell}$.

3) Nada atas kedua (f_2): $\ell = \dfrac{3}{2}\lambda_2$ atau $\lambda_2 = \dfrac{2\ell}{3}$.

Frekuensi yang dihasilkan $f_2 = \dfrac{v}{\lambda_2} = \dfrac{3v}{2\ell}$.

4) Nada atas ke n (f_n): $\ell = (n+1)\dfrac{1}{2}\lambda_n = \dfrac{1}{2}\lambda_o$.

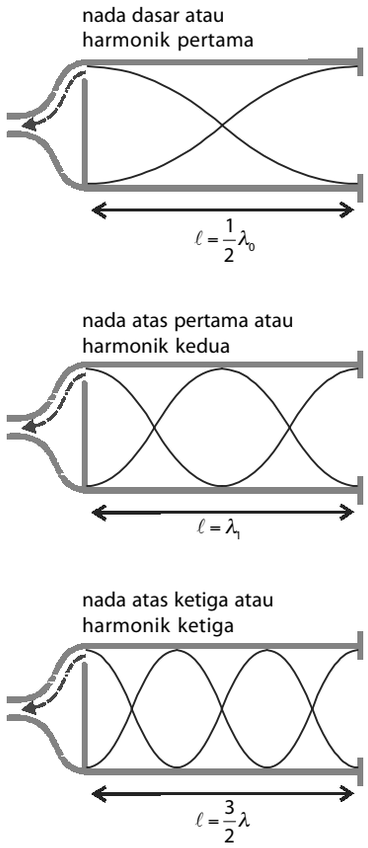
Frekuensi yang dihasilkan

$$f_n = (n+1)f_0 = (n+1)\frac{v}{2\ell} \qquad (3\text{–}9)$$

Perbandingan frekuensi gelombang yang dimiliki kolom udara pada pipa organa terbuka sama dengan perbandingan frekuensi gelombang pada dawai. Perbandingan frekuensi yang dihasilkan oleh setiap pola gelombang untuk pipa organa terbuka adalah

$$f_0 : f_1 : f_2 = \frac{v}{2\ell} : \frac{v}{\ell} : \frac{3v}{2\ell} = 1 : 2 : 3 \qquad (3\text{–}10)$$

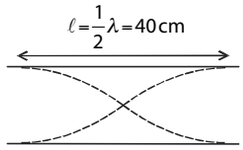
Persamaan (3–10) yang merupakan perbandingan frekuensi dikenal sebagai **Hukum I Bernoulli** dan merupakan perbandingan bilangan-bilangan bulat.



Gambar 3.11
Pola gelombang resonansi suatu pipa organa terbuka.

Contoh 3.6

Sebuah pipa organa terbuka panjangnya 40 cm. Tentukan nada dasar yang dihasilkan pipa tersebut jika cepat rambat bunyi di udara = 340 m/s.



Jawab:

Diketahui: panjang pipa (ℓ) = 40 cm = 0,4 m,

cepat rambat bunyi (v) = 340 m/s.

Dengan menggunakan **Persamaan (3–9)**, frekuensi nada dasar diperoleh

$\ell = \dfrac{1}{2}\lambda$ atau $\lambda = 2\ell$, maka $\lambda = (2)(0,4\,\text{m}) = 0,8\,\text{m}$

Syarat terjadinya nada dasar, yaitu $f_0 = \dfrac{v}{\lambda} = \dfrac{340\ \text{m/s}}{0,8\ \text{m}} = 425\,\text{Hz}$.

Contoh 3.7

Sebuah pipa organa terbuka yang panjangnya 1,5 m dan frekuensi harmoniknya berturut-turut 290 Hz dan 405 Hz. Tentukan cepat rambat bunyi pada pipa organa tersebut.

Jawab

Misalkan $f_n = 290$ Hz dan $f_{n+1} = 405$ Hz.

Dengan menggunakan **Persamaan (3–9)** diperoleh

$$f_{n+1} - f_n = \{(n+2) - (n+1)\}\frac{v}{2\ell}$$

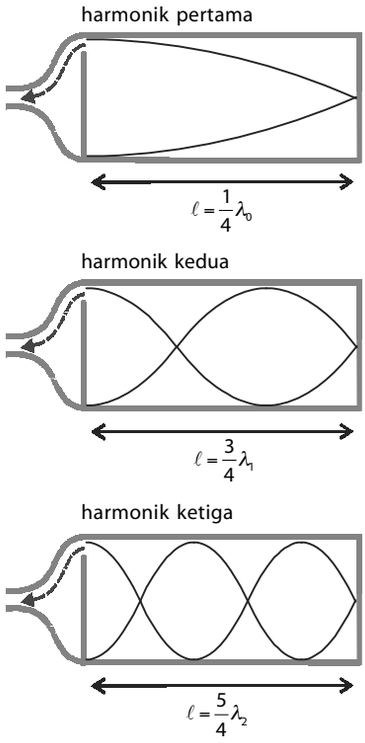
$$(405 - 290)\text{ Hz} = (n + 2 - n - 1)\frac{v}{2\ell}$$

$$115\text{ Hz} = \frac{v}{2(1,5\,m)}$$

$$v = 345\text{ m/s}$$

b. Pipa Organa Tertutup

Pipa organa tertutup adalah alat tiup berupa tabung yang salah satu ujung penampangnya tertutup. Salah satu ujung pipa organa tertutup menjadi simpul gelombang pada kolom udara dan ujung lainnya yang terbuka menjadi perut gelombang. Pola gelombang yang dihasilkan tampak seperti **Gambar 3.12**. Frekuensi yang dihasilkan oleh pipa organa tertutup adalah sebagai berikut.



Gambar 3.12
Pola gelombang resonansi pada suatu pipa organa tertutup.

1) Nada dasar (f_0): $\ell = \frac{1}{4}\lambda_0$ atau $\lambda_0 = 4\ell$.

 frekuensi yang dihasilkan, $f_0 = \frac{v}{\lambda_0} = \frac{v}{4\ell}$.

2) Nada atas pertama (f_1): $\ell = \frac{3}{4}\lambda_1$ atau $\lambda_1 = \frac{4}{3}\ell$.

 frekuensi yang dihasilkan, $f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = 3\left(\frac{v}{4\ell}\right)$.

3) Nada atas kedua (f_2): $\ell = \frac{5}{4}\lambda_2$ atau $\lambda_2 = \frac{4}{5}\ell$.

 frekuensi yang dihasilkan, $f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = 5\left(\frac{v}{4\ell}\right)$.

4) Nada atas ke–n (f_n): $\ell = (2n+1)\frac{1}{4}\lambda_n$ atau $\lambda_n = \frac{4\ell}{(2n+1)}$.

 Frekuensi yang dihasilkan

$$f_n = (2n+1)f_0 = (2n+1)\frac{v}{4\ell} \qquad (3\text{–}11)$$

Perbandingan frekuensi yang dihasilkan oleh setiap pola gelombang untuk pipa organa tertutup adalah

$$f_0 : f_1 : f_2 = \frac{v}{4\ell} : 3\left(\frac{v}{4\ell}\right) : 5\left(\frac{v}{4\ell}\right) = 1 : 3 : 5 \qquad (3\text{–}12)$$

Persamaan (3–12) yang merupakan perbandingan frekuensi dikenal sebagai **Hukum II Bernoulli** dan merupakan perbandingan bilangan-bilangan ganjil.

Contoh 3.8

Sebuah pipa organa tertutup memiliki panjang 25 cm. Apabila cepat rambat bunyi saat itu 340 m/s, tentukan frekuensi nada dasar f_0, nada atas pertama f_1, dan nada atas kedua f_2.

Jawab:

Diketahui: $\ell = 25\text{ cm} = 0{,}25\text{ m};\ v = 340\text{ m/s}$.

Berdasarkan **Persamaan (3–11)**, $f_n = (2n+1)f_0 = (2n+1)\dfrac{v}{4\ell}$, diperoleh

- nada dasar $(n = 0)$: $f_0 = \dfrac{v}{4\ell} = \dfrac{340\text{ m/s}}{4(0,25\text{ m})} = 340\text{ Hz}$
- nada atas pertama $(n = 1)$:
 $f_1 = [(2)(1) + 1)]\, f_0 = (3)(340) = 1.020\text{ Hz}$
- nada atas kedua $(n = 2)$: $f_2 = [(2)(2) + 1)]\, f_0 = (5)(340) = 1.700\text{ Hz}$.

Contoh 3.9

Sebuah pipa organa terbuka (1) dengan panjang 60 cm terjadi 3 buah simpul. Nada pipa organa tersebut beresonansi dengan pipa organa tertutup (2) dan membentuk 2 buah simpul. Berapa panjang pipa organa yang tertutup?

Jawab:

Resonansi terjadi jika f_1 sama dengan f_2.

Panjang pipa organa terbuka $\ell = 60$ cm, terjadi 3 simpul dan 3 perut $\left(\dfrac{3}{2}\lambda\right)$ sehingga

$$\ell_1 = \frac{3}{2}\lambda_1 \text{ atau } \lambda_1 = \frac{2}{3}\ell_1 \text{ maka } \lambda_1 = \frac{2}{3}(60\text{ cm}) = 40\text{ cm}$$

Pada pipa organa tertutup terjadi 2 simpul dan 2 perut $\left(\dfrac{3}{4}\lambda\right)$ sehingga

$$\ell_2 = \frac{3}{4}\lambda_2 \text{ atau } \lambda_2 = \frac{4}{3}\ell_2 \text{ maka } f_2 = \frac{v}{\lambda_2}$$

dengan menggunakan syarat resonansi, panjang pipa organa tertutup ℓ_2 dapat dihitung

$$f_2 = f_1 \Rightarrow \frac{v}{\lambda_2} = \frac{v}{\lambda_1} \Rightarrow \lambda_2 = \lambda_1 \Rightarrow \frac{4}{3}\ell_2 = 40\text{ cm} \Rightarrow \ell_2 = 30\text{ cm}$$

Pembahasan Soal

Pipa organa terbuka A dan pipa organa tertutup sebelah B memiliki panjang yang sama. Perbandingan frekuensi nada atas pertama antara pipa organa A dengan pipa organa B adalah

a. 1 : 1
b. 2 : 1
c. 2 : 3
d. 3 : 2
e. 4 : 3

UMPTN 1995

Pembahasan:

Pipa organa terbuka:

$\ell_A = \frac{1}{2}\lambda,\ \lambda,\ \frac{3}{2}\lambda,\$

Pada nada atas pertama:

$\ell_A = \lambda \rightarrow f_A = \frac{v}{x} = \frac{v}{\ell_A}$

Pipa organa tertutup:

$\ell_B = \frac{1}{4}\lambda,\ \frac{3}{4}\lambda,\ \frac{5}{4}\lambda,\$

Pada nada atas pertama:

$\ell_B = \frac{3}{4}\lambda \rightarrow \lambda = \frac{4}{3}\ell_B$

$f_B = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{\left(\frac{4}{3}\right)\ell_B} = \frac{3}{4}\frac{v}{\ell_B}$

Untuk $\ell_A = \ell_B$, diperoleh

$\frac{f_A}{f_B} = \frac{\frac{v}{\ell_A}}{\frac{3}{4}\frac{v}{\ell_B}} = \frac{4}{3}$

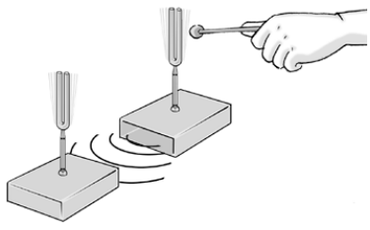
Jawaban: e

3. Resonansi

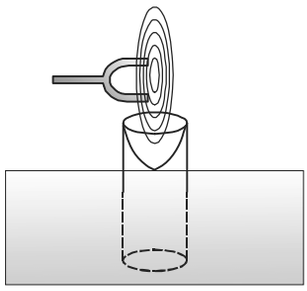
Peristiwa ikut bergetarnya suatu benda karena ada benda lain yang bergetar disebut *resonansi*. Syarat terjadinya resonansi adalah frekuensi getar kedua benda harus sama atau frekuensi benda yang ikut bergetar sama dengan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi benda yang bergetar. Perhatikan dua contoh peristiwa resonansi berikut ini.

a. Resonansi pada Garputala

Jika sebuah garputala dipukul, garputala tersebut bergetar seperti pada **Gambar 3.13**. Frekuensi gelombang bunyi yang dihasilkan bergantung pada bentuk, besar, dan bahan logam garputala tersebut. Ketika didekatkan pada garputala yang lain dan memiliki frekuensi bunyi sama, garputala kedua akan ikut bergetar. Peristiwa ikut bergetarnya garputala yang kedua disebut resonansi.



Gambar 3.13
Dua garputala yang memiliki frekuensi yang sama akan beresonansi.



Gambar 3.14
Sebuah kolom udara di atas permukaan air digetarkan oleh sebuah garputala.

b. Resonansi pada Kolom Udara

Perhatikan **Gambar 3.14** yang memperlihatkan peristiwa resonansi pada kolom udara. Jika kolom udara yang terletak di atas permukaan air digetarkan dengan menggunakan sebuah garputala, molekul-molekul udara di dalam kolom udara akan ikut bergetar. Syarat terjadinya resonansi pada kolom udara adalah

1) tepat pada permukaan air harus terbentuk rapatan/simpul gelombang,
2) pada ujung permukaan kolom udara merupakan perut/renggangan gelombang.

Untuk mendapatkan resonansi, panjang kolom udara di atas permukaan harus diubah-ubah. Adapun frekuensi dan panjang gelombang bunyinya tetap. Resonansi pertama akan terjadi jika panjang kolom udara di atas permukaan air $\frac{1}{4}\lambda$, resonansi kedua $\frac{3}{4}\lambda$, resonansi ketiga $\frac{5}{4}\lambda$, dan seterusnya.

Sama halnya dengan getaran udara pada pipa organa tertutup, hubungan panjang kolom udara (ℓ) terhadap panjang gelombang bunyi (λ) pada peristiwa resonansi kolam udara dapat ditulis sebagai berikut.

$$\ell_n = (2n+1)\frac{1}{4}\lambda \qquad (3\text{–}13)$$

Keterangan:
n = 0, 1, 2, 3 ...
ℓ_n = panjang kolom udara ke–n
λ = panjang gelombang bunyi

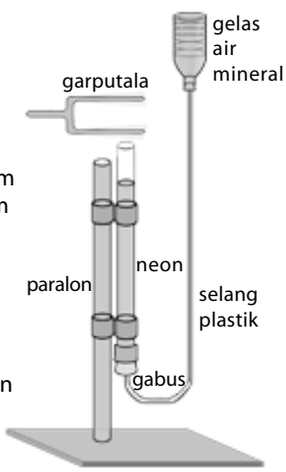
Jika frekuensi garputala diketahui, cepat rambat gelombang bunyi garputala dapat ditentukan melalui persamaan $v = f\lambda$. Agar Anda dapat mengaplikasikan proses pengukuran cepat rambat bunyi di udara berdasarkan konsep resonansi bunyi pada kolom udara, lakukanlah aktivitas berikut.

Aktivitas Fisika 3.3

Cepat Rambat Bunyi

Tujuan Percobaan
Mengukur cepat rambat bunyi di udara.

Alat-Alat Percobaan
1. Garputala
2. Lampu neon yang sudah tidak terpakai
3. Botol air mineral 100 m
4. Selang plastik berdiameter 1,5 cm dan panjang 2 m
5. Pipa paralon berdiameter 3 cm dan panjang 1 m
6. Penjepit
7. Penggaris
8. Gabus sebagai sumbat



Langkah-Langkah Percobaan
1. Rangkailah alat-alat tersebut seperti pada gambar.
2. Isilah lampu neon dengan air sampai ketinggian kolom udara 5 cm.
3. Getarkanlah garputala di atas lampu neon yang terbuka.
4. Lakukan pemompaan terhadap air dari lampu neon agar air keluar melalui selang dengan botol air mineral secara perlahan-lahan.

5. Berhentilah memompa air pada saat terdengar bunyi mendengung. Ukur panjang kolom saat itu dan catat sebagai l_1 (resonansi pertama) pada tabel pengamatan seperti berikut.

Data Pengamatan Resonansi Udara untuk Percobaan Cepat Rambat Udara

Resonansi ke–*n*	Panjang Kolom Udara (ℓ_n)
1.	
2.	
3.	

6. Turunkan permukaan air dalam lampu neon sampai terdengar bunyi mendengung lagi. Ukur panjang kolom saat itu dan catat sebagai l_2 (resonansi kedua) pada tabel pengamatan.
7. Ulangi langkah tersebut sampai didapatkan l_3, l_4, dan seterusnya.

Berdasarkan aktivitas tersebut, Anda akan mendapatkan data panjang kolom udara. Kemudian, bagaimanakah cara menghitung cepat rambat bunyi di udara? Perhatikan kembali **Persamaan (3–13)**.

$$\ell_n = (2n + 1)\ \frac{1}{4}\lambda$$

$$\ell_0 = \frac{1}{4}\lambda$$

$$\ell_1 = \frac{3}{4}\lambda$$

Ingatlah

Nilai frekuensi setiap garputala sudah diketahui. Analoginya seperti nilai fokus dari lensa.

Jika Anda menghitung selisih ℓ_1 dan ℓ_0, akan didapatkan

$$\ell_1 - \ell_0 = \frac{3}{4}\lambda - \frac{1}{4}\lambda = \frac{1}{2}\lambda$$

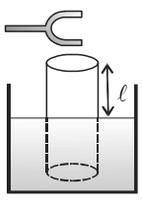
$$\lambda = 2\ (\ell_1 - \ell_0)$$

Oleh karena panjang gelombang sudah diketahui, Anda dapat menghitung cepat rambatnya, berdasarkan persamaan

$$\boxed{v = \lambda f} \qquad (3\text{–}14)$$

Keterangan:
v = cepat rambat bunyi (m/s)
λ = panjang gelombang garputala (m)
f = frekuensi garputala (Hz)

Contoh 3.10



Pada gambar tampak sebuah kolom udara yang panjangnya ℓ, untuk menghasilkan resonansi kolom udara secara vertikal. Jika kolom udara terpendek menghasilkan resonansi saat $\ell_0 = 12$ cm, tentukan frekuensi garputala f.

Tentukan pula panjang kolom udara pada resonansi selanjutnya. Diketahui cepat rambat bunyi di udara $v = 340$ m/s.

Jawab:
Diketahui: $\ell_0 = 12$ cm $= 0{,}12$ m; $v = 340$ m/s.
Pada peristiwa resonansi pertama dalam kolom udara berlaku hubungan berikut.

$\ell_0 = \frac{1}{4}\lambda$ atau $\lambda = 4\ell_0 = 4(12\,\text{cm}) = 48$ cm $= 0{,}48$ m

Kata Kunci

- resonansi
- Hukum Mersenne
- pipa organa
- Hukum I Bernoulli
- Hukum II Bernoulli

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{340 \text{ m/s}}{0,48 \text{ m}} = 708,33 \text{ Hz}$$

Jadi, frekuensi garputala adalah 708,33 Hz.

Panjang kolom udara pada resonansi kedua ($n = 1$) dan ketiga ($n = 2$) dapat ditentukan dengan **Persamaan (3–13)**, yaitu $\ell_n = (2n+1)\frac{1}{4}\lambda$ dan untuk resonansi kedua ($n = 1$) adalah

$$\ell_1 = (2\times 1+1)\frac{1}{4}(0,48 \text{ m}) = 0,36 \text{ m}$$

Jadi, untuk resonansi ketiga ($n = 2$): $\ell_2 = (2\times 2+1)\frac{1}{4}(0,48 \text{ m}) = 0,6 \text{ m}$.

Tes Kompetensi Subbab E

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Pada seutas dawai yang panjangnya 2 m dengan massa 20 g, perambatan gelombang tranversal yang dihasilkan memiliki kecepatan 50 m/s. Tentukan tegangan dawai tersebut.
2. Tali yang panjangnya 5 m ditegangkan dengan gaya 2 N. Perambatan gelombang transversal yang dihasilkan memiliki kecepatan 40 m/s. Tentukan massa tali tersebut.
3. Dua utas tali yang sama panjang ditarik oleh gaya yang sama. Massa tali pertama 4 kali massa tali kedua. Tali pertama digetarkan dengan frekuensi 200 Hz, sedangkan tali kedua 400 Hz. Jika panjang gelombang pada tali pertama 4 cm, tentukan panjang gelombang pada tali kedua.
4. Sebuah gelombang sinus merambat pada tali yang panjangnya 100 cm, bergerak dari simpangan minimum ke maksimum. Suatu titik memerlukan waktu 0,05 sekon dalam gerak tersebut. Tentukan:
 a. periode gelombang;
 b. frekuensi gelombang;
 c. gaya tegang tali jika diketahui panjang gelombang $\lambda = 0,8$ m dan massa tali 250 gram.
5. Sebuah pipa organa terbuka panjangnya 30 cm. Tentukan frekuensi nada dasar yang dihasilkan pipa tersebut jika cepat rambat bunyi di udara = 336 m/s.
6. Sebuah pipa organa tertutup panjangnya 25 cm. Tentukan nada dasar yang dihasilkan pipa itu jika cepat rambat bunyi di udara = 336 m/s.
7. Tentukan panjang minimum pipa organa terbuka yang beresonansi dengan garputala yang bergetar dengan frekuensi 170 Hz, jika cepat rambat bunyi di udara = 340 m/s.

F. Energi Gelombang Bunyi

Telah Anda ketahui bahwa gelombang adalah getaran yang merambat melalui zat perantara (medium), tetapi mediumnya tidak ikut merambat. Dalam perambatannya, gelombang memindahkan energi dari satu tempat ke tempat lain. Energi gelombang bunyi yang ditimbulkan dari suara pesawat jet *supersonic* dapat memecahkan kaca jendela suatu bangunan. Hal tersebut menunjukkan bahwa energi gelombang bunyi melakukan perambatan. Energi gelombang bunyi dapat ditentukan dari energi potensial maksimum getaran karena bunyi merupakan gelombang longitudinal hasil perambatan getaran. Oleh karena itu, energi gelombang bunyi dapat dinyatakan dengan yaitu sebagai berikut

$$E = \frac{1}{2}kY^2$$

karena

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

atau

$$k = 4\pi^2 m f^2$$

maka diperoleh

$$E = 2\pi^2 m f^2 Y_m^2 \qquad (3\text{–}15)$$

Keterangan:
m = massa partikel (kg)
Y_m = amplitudo gelombang (m)
f = frekuensi getar (Hz)
k = konstanta pegas (N/m)

Berdasarkan **Persamaan (3–15)**, energi yang dipindahkan oleh suatu gelombang sebanding dengan kuadrat amplitudonya.

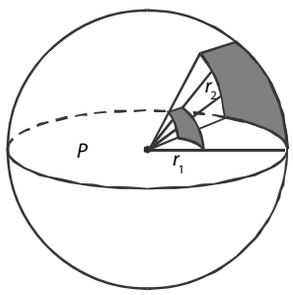
1. Intensitas Gelombang Bunyi

Intensitas gelombang bunyi didefinisikan sebagai jumlah energi bunyi per satuan waktu yang menembus tegak lurus suatu bidang per satuan luas. Hubungan antara daya (P), luas (A), dan intensitas bunyi (I) memenuhi persamaan

$$I = \frac{P}{A} \qquad (3\text{–}16)$$

Keterangan:
I = intensitas gelombang bunyi (W/m^2)
A = luas penampang (m^2)
P = daya gelombang bunyi (W)

Sumber bunyi berupa sebuah titik, seperti pada **Gambar 3.15** akan memancarkan bunyi ke segala arah. Artinya, gelombang bunyi merambat dalam tiga dimensi. Hal yang sama terjadi pula pada gelombang cahaya. Intensitas bunyi pada bidang permukaan dalam bola yang memiliki jari-jari r akan memiliki luas $A = 4\pi r^2$ (anggap tidak ada energi bunyi yang hilang atau terserap selama perambatan).



Gambar 3.15
Sumber bunyi berupa titik. Semakin jauh dari sumber bunyi, luas permukaan semakin besar.

Intensitas bunyi akan semakin kecil jika jarak sumber bunyi ke suatu bidang permukaan semakin jauh. Pengurangan intensitas bunyi akibat pertambahan jarak dari sumber bunyi memenuhi hubungan berikut.

$$I_1 : I_2 = \frac{P}{4\pi r_1^2} : \frac{P}{4\pi r_2^2} = \frac{1}{r_1^2} : \frac{1}{r_2^2}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \qquad (3\text{–}17)$$

Keterangan:
r_1 = jarak sumber bunyi ke posisi bidang 1 (m)
r_2 = jarak sumber bunyi ke posisi bidang 2 (m)

Berdasarkan **Persamaan (3–17)**, dapat dinyatakan bahwa intensitas bunyi berbanding terbalik dengan kuadrat jarak sumber bunyi tersebut ke bidang pendengaran.

Ingatlah

1 bel (B) = 10 desibel (dB)

Tugas Anda 3.4

Berapakah rasio intensitas bunyi 90 dB terhadap intensitas bunyi 60 dB?

2. Taraf Intensitas (TI)

Setiap makhluk di alam semesta ini memiliki batas intensitas pendengaran. Batas intensitas bunyi yang dapat didengar telinga manusia adalah sebagai berikut.

a. Intensitas terkecil yang masih dapat menimbulkan rangsangan pendengaran pada telinga adalah sebesar 10^{-12} watt/m^2 yang disebut sebagai *intensitas ambang pendengaran*.
b. Intensitas terbesar yang masih mampu diterima telinga manusia tanpa rasa sakit adalah sebesar 1 watt/m^2 yang disebut *batas ambang pendengaran*.

Jadi, batas pendengaran terendah adalah 10^{-12} watt/m^2 dan batas intensitas tertinggi adalah 1 watt/m^2. Taraf intensitas (TI) sebanding dengan logaritma perbandingan antara intensitas bunyi dan harga ambang intensitas bunyi yang terdengar dan memiliki satuan desibel (dB). Secara matematis, hubungan antara I dan TI ditulis

$$TI = 10 \log \frac{I}{I_0} \qquad (3\text{–}18)$$

Keterangan:
TI = taraf intensitas (dB)
I = intensitas bunyi (W/m^2)
I_0 = 10^{-12} W/m^2 = intensitas ambang pendengaran

Berikut ini data intensitas dan taraf intensitas dari beberapa sumber bunyi.

Tabel 3.2
Intensitas dan Taraf Intensitas dari Beberapa Sumber Bunyi

Sumber Bunyi	Taraf Intensitas (dB)	Intensitas (W/m^2)
Ambang pendengaran	0	1×10^{-12}
Ambang rasa sakit	120	1
Sirine pada jarak 30 m	100	1×10^{-2}
Lalu lintas ramai	70	1×10^{-5}
Percakapan biasa pada jarak 50 cm	65	$3{,}2 \times 10^{-6}$
Radio pelan	40	1×10^{-8}
Bisik-bisik	20	1×10^{-10}

Sumber: *College Physics*, 1980

Contoh 3.11

Taraf intensitas bunyi sebuah pesawat pada jarak 20 m adalah 120 dB. Berapa taraf intensitas bunyi pada jarak 200 m?

Jawab:
Diketahui: $r_1 = 20$ m; $r_2 = 200$ m; $TI_1 = 120$ dB.
Intensitas bunyi berbanding terbalik dengan kuadrat jarak

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 = \left(\frac{20}{200}\right)^2 = \frac{1}{100}$$

$$I_1 = 100 I_2$$

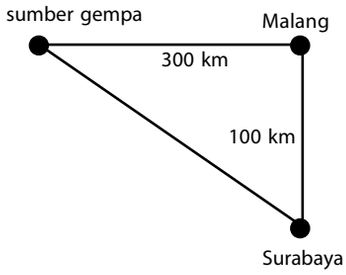
dengan menggunakan **Persamaan (3–18)** untuk TI_2 dan TI_1, diperoleh

$$TI_2 = 10 \log \frac{I_2}{I_0}$$

$$TI_1 = 10 \log \frac{I_1}{I_0}$$

$$TI_2 - TI_1 = 10 \left[\log \frac{I_2}{I_0} - \log \frac{I_1}{I_0}\right]$$

Pembahasan Soal



Suatu gelombang gempa terasa di Malang dengan intensitas 6×10^5 W/m^2. Sumber gempa berasal dari suatu tempat yang berjarak 300 km dari Malang. Jika jarak antara Malang dan Surabaya sebesar 100 km dan ketiga tempat itu membentuk segitiga siku-siku dengan sudut siku-siku di Malang, maka intensitas gempa yang terasa di Surabaya adalah

a. 2×10^5 W/m^2
b. 3×10^5 W/m^2
c. $4{,}5 \times 10^5$ W/m^2
d. $5{,}4 \times 10^5$ W/m^2
e. $7{,}5 \times 10^5$ W/m^2

UMPTN 1996

Pembahasan:

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \rightarrow I_2 = I_1 \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$$

$$I_2 = 6 \times 10^5 \times \left(\frac{300}{\sqrt{10^5}}\right)^2$$

$$= 5{,}4 \times 10^5 \text{ W/m}^2$$

Jawaban: d

Kata Kunci

- energi gelombang bunyi
- intensitas gelombang
- taraf intensitas
- batas ambang pendengaran

$$TI_2 - TI_1 = 10\left[\log\frac{\frac{I_2}{I_0}}{\frac{I_1}{I_0}}\right]$$

$$TI_2 = TI_1 + 10\log\frac{I_2}{I_1} = TI_1 + 10\log\frac{I_2}{100I_2} = 120\text{ dB} + 10\log 10^{-2} = 100\text{ dB}$$

Jadi, taraf intensitas bunyi pada jarak 200 m adalah 100 dB.

Jika terdapat sumber bunyi yang lebih dari satu, taraf intensitas totalnya dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut.

$$TI_{(n)} = TI_{(1)} + 10\log n \qquad (3\text{–}19)$$

Keterangan:
$TI_{(n)}$ = taraf intensitas oleh n buah sumber
n = banyaknya sumber
$TI_{(1)}$ = taraf intensitas oleh 1 buah sumber

Contoh 3.12

Sebuah sumber bunyi menghasilkan taraf intensitas sebesar 50 dB. Berapa taraf intensitas yang dihasilkan jika terdapat 100 sumber bunyi yang sama dan berbunyi pada saat bersamaan?

Jawab:
Diketahui: $TI = 50$ dB; $n = 100$.
Untuk sebuah sumber bunyi,

$$TI = 10\log\frac{I}{I_0}$$

$$50 = 10\log\frac{I}{I_0} \Rightarrow I = 10^5 I_0$$

Untuk 100 buah sumber bunyi,
$I = 100 \times 10^5 I_0 = 10^7 I_0$

$$\text{maka TI} = 10\log\frac{I}{I_0} = 10\log\frac{10^7 I_0}{I_0} = 10\log 10^7 = 70\text{ dB.}$$

Tes Kompetensi Subbab F

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Sebuah sumber bunyi memiliki taraf intensitas sebesar 25 dB. Jika 60 buah sumber bunyi yang sama berbunyi serentak, berapa taraf intensitas bunyi yang dihasilkan?
2. Berapa perbandingan intensitas dua sumber bunyi jika taraf intensitasnya 15 dB?
3. Sebuah sumber bunyi titik dengan daya 12,56 watt memancarkan gelombang bunyi berupa gelombang sferis (bola). Tentukan taraf intensitas bunyi yang didengar oleh seseorang pada jarak 100 meter dari sumber bunyi tersebut. ($I_0 = 10^{-12}$ watt/m^2).
4. Sebuah sumber bunyi memiliki taraf intensitas 6 bell. Jika 10 buah sumber bunyi yang sama berbunyi secara serentak, berapakah taraf intensitas bunyi yang dihasilkan?

(Ebtanas 1985)

5. Sebuah sumber bunyi memancarkan energi ke segala arah. Apabila jarak pendengar terhadap sumber bunyi dibuat menjadi 8 kali semula, berapa pengurangan taraf intensitas bunyi yang terdengar?

Rangkuman

1. Gelombang bunyi adalah gelombang longitudinal yang dapat merambat dalam medium zat padat, cair, dan gas.
2. Cepat rambat bunyi di udara bergantung pada jenis partikel pembentuk udara yang dinyatakan dengan

$$v = \sqrt{\frac{\gamma R.T}{M}}$$

sedangkan di dalam zat padat bergantung pada modulus Young dan massa jenis zat.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Adapun di dalam zat cair bergantung pada modulus Bulk dan massa jenis zat cair.

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

3. Tinggi rendah nada bunyi bergantung pada frekuensi bunyi. Kuat bunyi bergantung pada amplitudo getaran.
4. Audiosonik adalah bunyi yang berfrekuensi antara 20 Hz sampai dengan 20.000 Hz. Infrasonik adalah bunyi yang berfrekuensi di bawah 20 Hz, sedangkan ultrasonik adalah bunyi yang berfrekuensi di atas 20.000 Hz.
5. Gelombang bunyi dapat mengalami proses dispersi, refraksi, refleksi, difraksi, interferensi, dan polarisasi.
6. Interferensi gelombang bunyi terjadi jika beda lintasan gelombangnya merupakan kelipatan bilangan bulat dari setengah panjang gelombang bunyi.

$$\Delta s = \frac{(n+1)\lambda}{2};\ n = 0, 1, 2, 3, \ldots.$$

7. Persamaan superposisi gelombang bunyi

$$y = 2A \cos 2\pi ft \left(\frac{\Delta f}{2}\right) \sin 2\pi ft$$

8. Frekuensi dan nada dasar pada dawai dinyatakan dengan persamaan

$$f_o = \frac{1}{2\ell}\sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

sedangkan frekuensi nada atas ke-n pada dawai dinyatakan dengan persamaan

$$f_n = (n+1) f_o = \left(\frac{n+1}{2\ell}\right)\sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

9. Pada pipa organa terbuka, frekuensi nada atas ke-n dinyatakan dengan persamaan

$$f_n = (n+1)\frac{v}{2\ell}$$

sedangkan pada pipa organa tertutup, frekuensi nada atas ke-n dinyatakan dengan

$$f_n = (2n+1)\frac{v}{4\ell}$$

10. Hubungan panjang kolom udara (ℓ) terhadap panjang gelombang bunyi (λ) pada peristiwa resonansi kolom udara adalah

$$\ell_n = (2n+1)\frac{1}{4}\lambda$$

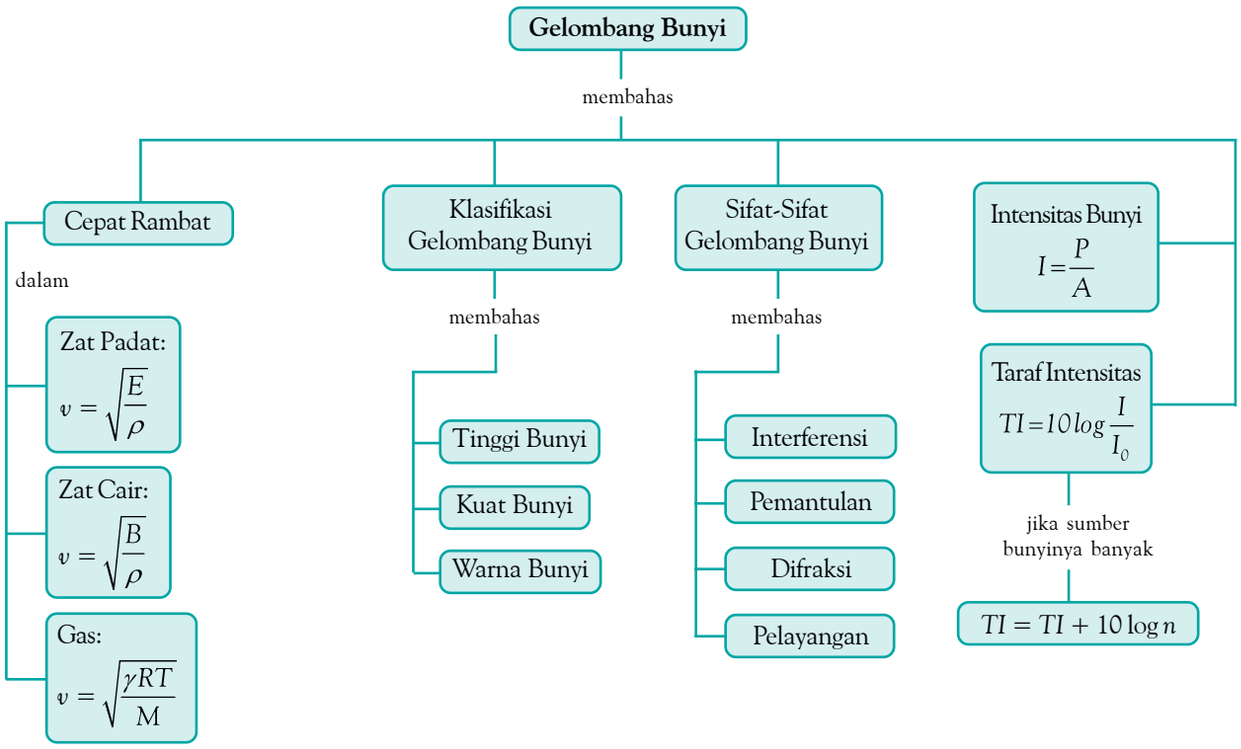
11. Dalam perambatannya, gelombang bunyi memindahkan energi sebesar $E = 2\pi^2 m f^2 y_m^{\ 2}$ dengan y_m adalah amplitudo gelombang.
12. Semakin jauh jarak sumber bunyi terhadap pendengar, intensitas bunyi akan semakin kecil.
13. Intensitas bunyi dinyatakan dengan persamaan

$$TI = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

14. Jika terdapat n buah sumber bunyi, taraf intensitas bunyi totalnya dinyatakan dengan persamaan

$$TI_{(n)} = TI_{(1)} + 10 \log n$$

Peta Konsep



Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, Anda tentu dapat mengetahui sifat-sifat dasar gelombang bunyi dan klasifikasi gelombang bunyi serta dapat menjelaskan peristiwa resonansi pada pipa organa. Dari materi bab ini, bagian manakah yang Anda anggap sulit? Coba diskusikan dengan teman atau guru Fisika Anda.

Pada bab ini pula, Anda telah mempelajari manfaat dari gelombang bunyi, seperti untuk mengukur kedalaman laut. Coba Anda sebutkan manfaat lain yang Anda rasakan setelah mempelajari bab ini.

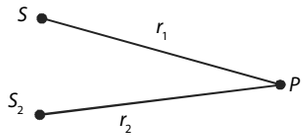
Tes Kompetensi Bab 3

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan.

1. Pada suatu saat terlihat kilat dan 10 detik kemudian terdengar suara gunturnya. Jika besar kecepatan cahaya = 3×10^8 m/s dan kecepatan bunyi = 340 m/s, jarak antara tempat asal kilat dan pengamat
 a. 34 m
 b. 3.400 m
 c. 10.200 m
 d. 3×10^8 m
 e. 3×10^9 m

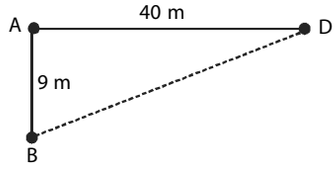
2. Sebuah alat sonar digunakan untuk mengukur kedalaman laut. Selang waktu yang dicatat oleh sonar untuk gelombang merambat hingga kembali lagi ke sonar adalah 1 sekon. Jika cepat rambat gelombang di dalam air laut adalah 1.500 m/s, kedalaman laut tersebut adalah
 a. 500 m
 b. 750 m
 c. 1.000 m
 d. 1.250 m
 e. 1.500 m

3. Dua buah sumber bunyi seperti tampak pada gambar berikut bergetar secara koheren. Bunyi yang nyaring dihasilkan di *P* jika $r_1 = r_2$. Dengan menaikkan secara perlahan-lahan r_1, bunyi terlemah didengar ketika $r_1 - r_2$ adalah 20 cm, 60 cm, dan 100 cm. Jika cepat rambat bunyi di udara 340 m/s, besar frekuensi bunyi adalah



 a. 136 Hz
 b. 425 Hz
 c. 680 Hz
 d. 850 Hz
 e. 1.700 Hz

4. Dua buah *loudspeaker* A dan B diletakkan seperti pada gambar berikut. Ternyata pada detektor D terjadi interferensi maksimum orde pertama. Jika kecepatan bunyi di udara = 330 m/s, frekuensi gelombang bunyi tersebut tersebut adalah



 a. 165 Hz
 b. 330 Hz
 c. 495 Hz
 d. 660 Hz
 e. 750 Hz

5. Modulus Bulk suatu zat cair yang memiliki massa jenis 0,3 gram/cm^3 adalah $1{,}2 \times 10^9$ N/m^2. Cepat rambat gelombang dalam zat cair tersebut adalah
 a. 1.500 m/s
 b. 2.000 m/s
 c. 2.500 m/s
 d. 3.000 m/s
 e. 4.000 m/s

6. Sebuah sumber bunyi berfrekuensi 1 kHz bergerak langsung ke arah seorang pendengar dengan kelajuan 0,9 kali kelajuan bunyi. Frekuensi bunyi yang diterimanya adalah
 a. 10,0 kHz
 b. 1,9 kHz
 c. 1,1 kHz
 d. 0,5 kHz
 e. 0,1 kHz

 (Soal UM – UGM 2003)

7. Anda sedang bergerak mendekati sebuah sumber bunyi S tidak bergerak yang berada jauh di depan Anda dan sedang memancarkan bunyi berfrekuensi f_0 ke segala arah. Agak jauh di belakang Anda, terdapat sebuah dinding pemantul D. Bunyi yang Anda dengar langsung dari S dengan frekuensi f_s dan yang berasal dari pantulan di D dengan frekuensi f_d ketika berinteraksi di telinga Anda adalah
 a. tidak akan menimbulkan layangan karena $f_s = f_d > f_0$.
 b. tidak akan menimbulkan layangan karena $f_s = f_d \neq f_0$.
 c. akan menimbulkan layangan dan memenuhi $f_s > f_d = f_0$.
 d. akan menimbulkan layangan dan memenuhi $f_s > f_0 > f_d$.
 e. akan menimbulkan layangan dan memenuhi $f_s > f_d > f_0$.

8. Sebuah sumber bunyi bergerak dengan kecepatan *a* m/s menuju ke pendengar yang diam sehingga frekuensi yang didengar oleh pendengar adalah f_1. Jika sumber bunyi tersebut diam, sedangkan pendengar bergerak dengan kecepatan *a* m/s mendekati sumber bunyi, frekuensi yang didengar oleh pendengar adalah f_2. Jika cepat rambat bunyi di udara *v* m/s, perbandingan $f_1 : f_2$ adalah
 a. 1
 b. $1 - \frac{a}{v}$
 c. $1 + \frac{a}{v}$
 d. $1 - \frac{a^2}{v^2}$
 e. $1 + \frac{a^2}{v^2}$

9. Seorang penerbang yang pesawat terbangnya menuju ke menara bandara mendengar bunyi sirine menara dengan frekuensi 2.000 Hz. Jika saat itu sirine tersebut memancarkan bunyi dengan frekuensi 1.700 Hz dan cepat rambat bunyi di udara = 340 m/s, kecepatan pesawat terbang tersebut adalah
 a. 108 km/jam
 b. 200 km/jam
 c. 216 km/jam
 d. 220 km/jam
 e. 236 km/jam

10. Pelayangan bunyi terjadi karena adanya interferensi
 a. lebih dari 2 gelombang yang sama frekuensinya
 b. 2 gelombang yang berlawanan arah getarnya
 c. 2 gelombang yang sama frekuensinya
 d. 2 gelombang yang besar beda frekuensinya
 e. 2 gelombang yang kecil beda frekuensinya

11. Jika dua buah sumber bunyi masing-masing dengan frekuensi 2.000 Hz dan 2.008 Hz berbunyi serentak, akan timbul pelayangan bunyi dengan frekuensi
 a. 2 Hz
 b. 4 Hz
 c. 8 Hz
 d. 2.004 Hz
 e. 2.008 Hz

12. Seutas dawai menghasilkan resonansi pertama pada $\ell = 40$ cm. Jika panjang kawat 120 cm dan bergetar pada nada atas kedua, cepat rambat gelombang transversal dalam kawat adalah (cepat rambat bunyi di udara = 340 m/s)
 a. 127,5 m/s
 b. 170 m/s
 c. 340 m/s
 d. 225 m/s
 e. 85 m/s

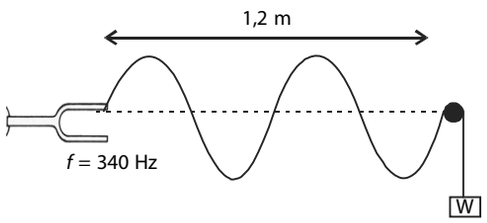
13. Dua buah dawai baja yang identik memberikan nada dasar dengan frekuensi 400 Hz. Jika tegangan dalam salah satu dawai ditambah 2%, frekuensi pelayangan yang terjadi adalah
 a. 0 Hz
 b. 2 Hz
 c. 4 Hz
 d. 6 Hz
 e. 8 Hz

14. Sebuah tabung gelas resonansi yang berisi air memiliki luas penampang 10 cm^2. Pada posisi tersebut terjadi resonansi pertama. Sejumlah 400 cm^3 air dibuang keluar, sehingga terjadi resonansi kedua. Jika kelajuan bunyi di udara = 300 m/s, frekuensi garputala yang dipakai adalah
 a. 150 Hz
 b. 300 Hz
 c. 375 Hz
 d. 750 Hz
 e. 1.500 H

15. Pada percobaan Melde digunakan seutas benang yang panjangnya 1 meter dan bermassa 5 gram. Jika beban sebesar 0,2 kg digantungkan pada benang tersebut, kecepatan perambatan gelombang pada benang adalah ... ($g = 10$ m/s^2)
 a. 5 m/s
 b. 10 m/s
 c. 20 m/s
 d. 24 m/s
 e. 40 m/s

16. Seutas dawai menghasilkan nada dasar *f*. Jika dawai tersebut dipendekkan 8 cm tanpa mengubah tegangan, dihasilkan frekuensi 1,25 *f*. Jika dawai dipendekkan 2 cm lagi, frekuensi yang dihasilkan adalah ...
 a. *f*
 b. 1,25 *f*
 c. 1,33 *f*
 d. 1,5 *f*
 e. 2,0 *f*

17. Seutas dawai yang panjangnya 80 cm dan bermassa 16 gram dijepit kedua ujungnya dan direntangkan dengan tegangan 800 N. Frekuensi nada atas pertama yang dihasilkan adalah
 a. 125 Hz
 b. 150 Hz
 c. 250 Hz
 d. 300 Hz
 e. 375 Hz

18. 

 Ketika garputala digetarkan pada dawai terjadi gelombang stasioner seperti tampak pada gambar. Kecepatan rambat gelombang pada dawai adalah
 a. 102 m/s
 b. 204 m/s
 c. 306 m/s
 d. 408 m/s
 e. 510 m/s

19. Sebuah pipa organa tertutup memiliki panjang 40 cm. Jika cepat rambat bunyi di udara 250 m/s, besar frekuensi nada atas kedua adalah
 a. 327 Hz
 b. 439 Hz
 c. 581 Hz
 d. 673 Hz
 e. 781 Hz

20. Nada atas pertama pipa organa terbuka yang panjangnya 40 cm beresonansi dengan pipa organa tertutup. Jika pada saat beresonansi jumlah simpul pada kedua pipa sama, panjang pipa organa tertutup tersebut (dalam cm) adalah
 a. 20
 b. 30
 c. 40
 d. 50
 e. 60

(UMPTN 1998 Rayon B)

21. Pada pipa organa terbuka, nada atas kedua dihasilkan panjang gelombang sebesar *x* dan pada pipa organa tertutup, nada atas kedua dihasilkan panjang gelombang sebesar *y*. Jika panjang kedua pipa sama, nilai perbandingan *y* dan *x* adalah
 a. 2 : 1
 b. 3 : 4
 c. 4 : 3
 d. 5 : 6
 e. 6 : 5

22. Taraf intensitas bunyi sebuah mesin rata-rata 50 dB. Jika 100 mesin dihidupkan bersama, taraf intensitasnya adalah
 a. 20 dB
 b. 50 dB
 c. 70 dB
 d. 75 dB
 e. 150 dB

23. Jika sebuah sepeda motor melewati seseorang, motor tersebut akan menimbulkan taraf intensitas (TI) sebesar 80 dB. Jika orang tersebut dilewati 10 sepeda motor jenis yang sama sekaligus, taraf intensitasnya adalah
 a. 8 dB
 b. 70 dB
 c. 80 dB
 d. 90 dB
 e. 800 dB

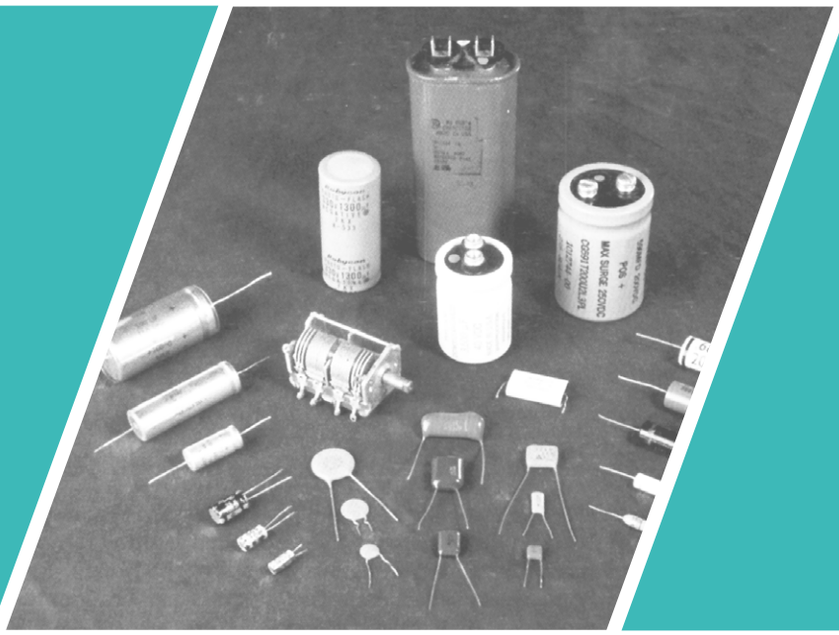
24. Taraf intensitas bunyi sebuah mesin adalah 60 dB (dengan acuan intensitas ambang pendengaran sebesar 10^{-12} W/m). Jika taraf intensitas di dalam ruang pabrik yang menggunakan sejumlah mesin tersebut adalah 80 dB, jumlah mesin yang digunakan adalah
 a. 200
 b. 140
 c. 100
 d. 20
 e. 10

25. Taraf intensitas bunyi pada sebuah jendela terbuka yang luasnya 1 m^2 adalah 60 dB. Jika nilai ambang bunyi 10^{-16} W/cm^2, daya akustik yang masuk melalui jendela tersebut adalah
 a. 10^{-16} W
 b. 10^{-12} W
 c. 10^{-10} W
 d. 10^{-6} W
 e. 10^{-4} W

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan tepat.

1. Sebuah garputala berfrekuensi 440 Hz digetarkan di permukaan tabung resonansi. Pada saat kolom udara mencapai ketinggian 18,75 cm terjadi resonansi yang pertama. Berapakah cepat rambat bunyi saat itu?
2. Seutas kawat yang panjangnya 50 cm diikat kedua ujungnya. Kemudian, kawat digetarkan longitudinal. Cepat rambat gelombang yang dihasilkan 4.000 m/s. Modulus Young kawat = $1{,}6 \times 10^{11}$ N/m^2. Hitunglah
 a. frekuensi getarnya;
 b. massa jenis kawat.
3. Mobil *A* mendekati pengamat *P* (diam) dengan kecepatan 30 m/s sambil membunyikan sirene berfrekuensi 504 Hz. Pada saat itu juga mobil *B* mendekati *P* dari arah yang berlawanan dengan *A*, pada kecepatan 20 m/s sambil membunyikan sirine berfrekuensi 518 Hz. Jika cepat rambat bunyi di udara saat itu 300 m/s, berapakah frekuensi layangan yang didengar oleh *P*?
4. Seutas kawat baja yang massanya 5 g dan panjang 1 m diberi tegangan 968 N. Tentukan:
 a. cepat rambat panjang gelombang transversal sepanjang kawat;
 b. panjang gelombang dan frekuensi nada dasarnya;
 c. frekuensi nada atas kesatu dan kedua.
5. Frekuensi nada atas pertama dari pipa organa terbuka 500 Hz. Jika cepat rambat bunyi di udara 340 m/s, hitunglah:
 a. frekuensi nada dasarnya;
 b. frekuensi nada atas ketiga.
6. Cepat rambat bunyi dalam sebuah pipa organa adalah 340 m/s. Jika frekuensi nada dasar pipa organa adalah 240 Hz, berapa panjang minimum pipa organa untuk kasus
 a. pipa organa terbuka;
 b. pipa organa tertutup.
7. Dua utas dawai baja sejenis memberikan nada dasar 204 Hz. Jika panjang salah satu dawai ditambah 2%, berapakah frekuensi layangan yang terjadi?
8. Dua utas dawai baja yang identik memberikan nada dasar dengan frekuensi 400 Hz. Jika tegangan dalam salah satu dawai ditambah 2%, berapa frekuensi layangan dawai yang mungkin?
9. Seekor tawon yang mendengung pada jarak 1 m memiliki taraf intensitas 10 dB. Jika ada 100 tawon mendengung pada jarak *x*, taraf intensitasnya 60 dB, tentukan jarak *x*.
10. Pada sebuah tabung resonansi terdapat kolom udara pada *t*. Selisih panjang kolom resonansi = 40 cm. Kecepatan bunyi pada suhu 0°C adalah 347 m/s. Hitung *t* jika frekuensi resonansi = 440 Hz.

Bab 4



Sumber: *Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics*, 2000

Berbagai jenis kapasitor yang berfungsi untuk menyimpan muatan listrik.

Medan Listrik, Potensial Listrik, dan Kapasitor

Hasil yang harus Anda capai:

menerapkan konsep kelistrikan dan kemagnetan dalam berbagai penyelesaian masalah dan produk teknologi.

Setelah mempelajari bab ini, Anda harus mampu:

memformulasikan gaya listrik, kuat medan listrik, fluks, potensial listrik, energi potensial listrik, serta penerapannya pada keping sejajar.

Di SMP, Anda tentu telah mempelajari mengenai listrik. Listrik sudah ada sejak jagat raya ini lahir. Ledakan petir merupakan contoh keberadaan listrik karena petir adalah hasil pelepasan muatan listrik di awan.

Banyak sekali aplikasi listrik dalam kehidupan sehari-hari. Televisi, radio, komputer, dan alat-alat elektronik lain menggunakan listrik sebagai sumber energinya. Setelah ditemukannya listrik, banyak ditemukan teknologi-teknologi baru. Sebagai contoh, lihatlah bagian dalam sebuah radio. Di dalamnya, Anda dapat melihat bermacam-macam komponen listrik. Dapatkah Anda menyebutkan nama-nama komponen listrik yang terdapat di dalam radio?

Di antara sekian banyak komponen yang terdapat di dalam radio, Anda pasti menemukan kapasitor. Apakah kapasitor itu? Apa kegunaan kapasitor? Bagaimana cara kerja sebuah kapasitor?

Anda pasti ingin mengetahui jawaban dari pertanyaan-pertanyaan tersebut. Untuk itu, temukan jawabannya dengan mempelajari bab ini.

A. Muatan Listrik
B. Medan Listrik
C. Energi Potensial Listrik dan Potensial Listrik
D. Kapasitor

Tes Kompetensi Awal

Sebelum mempelajari konsep Medan Listrik, Potensial Listrik, dan Kapasitor, kerjakanlah soal-soal berikut dalam buku latihan.

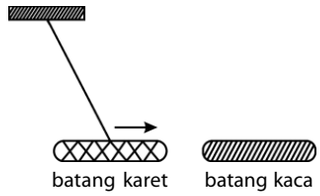
1. Apakah setiap benda memiliki muatan listrik?
2. Apa sajakah penyusun dari sebuah atom? Jelaskan penyusun-penyusunnya tersebut.
3. Apa yang Anda ketahui tentang kapasitor? Apa sajakah fungsinya? Bagaimana prinsip dasar kerjanya?
4. Apa yang dimaksud dengan medan listrik?

A. Muatan Listrik

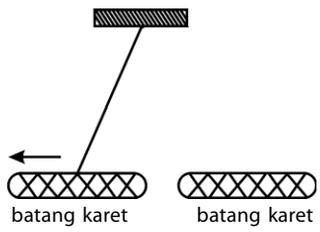


Sumber: *Conceptual Physics,* 1998

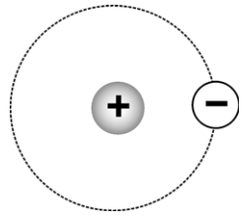
Gambar 4.1
Mesin fotokopi



Gambar 4.2
Setelah batang karet digosok kain wol dan batang kaca digosok kain sutra kedua batang tersebut tarik-menarik.



Gambar 4.3
Setelah kedua batang karet digosok kain wol dan didekatkan, kedua batang karet tolak-menolak.



Gambar 4.4
Pada atom hidrogen terdapat satu proton dan satu elektron.

Proses duplikasi naskah oleh mesin fotokopi merupakan salah satu contoh aplikasi konsep listrik statis dalam kehidupan sehari-hari. Pembentukan salinan hasil fotokopi karena penempelan serbuk atau toner yang bermuatan negatif pada permukaan kertas. Contoh lain gejala listrik statis yang lebih sederhana adalah menempelnya rambut atau potongan kertas pada penggaris plastik yang telah digosok kain wol.

Kedua gejala Fisika tersebut menunjukkan bahwa dua buah benda dapat saling menarik. Bagaimana para ahli fisika menjelaskan gejala tersebut?

Perhatikan kedua peristiwa pada **Gambar 4.2** dan **Gambar 4.3**. Ketika sebuah batang karet digosok dengan kain wol, kemudian didekatkan pada batang kaca yang digosok kain sutra, ternyata kedua batang tersebut tarik-menarik. Sebaliknya, sebuah batang karet yang digosok dengan kain wol dan didekatkan dengan batang karet yang lain, ternyata kedua batang karet tolak-menolak. Untuk menjelaskan gejala tersebut, dapat dianggap bahwa penggosokan kain wol dan kain sutra pada batang memberikan muatan listrik pada batang tersebut.

Berdasarkan gejala fisika tesebut, jelas bahwa muatan pada kaca dan muatan pada batang karet berbeda jenisnya. **Benjamin Franklin** (1706–1790) menyebutkan bahwa muatan listrik pada batang kaca sebagai muatan positif. Adapun muatan pada batang karet disebut muatan negatif.

Benda tersusun atas ribuan bahkan jutaan atom. Atom tersusun atas proton, neutron, dan elektron. Proton dan neutron terdapat di dalam inti atom, sedangkan elektron terdapat di kulit atom. Jumlah proton dan elektron dalam sebuah atom adalah sama. Itulah sebabnya, atom bersifat netral. Sebagai contoh, atom hidrogen mengandung satu proton dan satu elektron.

Atom bermuatan positif adalah atom yang memiliki jumlah proton lebih banyak dari jumlah elektron, sedangkan atom bermuatan negatif adalah atom yang memiliki jumlah proton lebih sedikit daripada jumlah elektron.

Benda bermuatan netral tersusun atas atom-atom yang tidak bermuatan (netral). Atom netral adalah atom yang memiliki jumlah proton sama dengan jumlah elektron, misalnya atom hidrogen seperti terlihat pada **Gambar 4.4**.

1. Interaksi Elektrostatis antara Dua Muatan Listrik

Jenis interaksi elektrostatis ada 2 macam, yaitu:

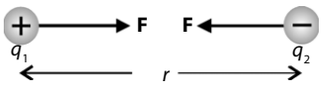
a. tarik-menarik antara muatan-muatan tidak sejenis;
b. tolak-menolak antara muatan-muatan sejenis.

Charles Augustin Coulomb (1736–1806) mengukur besarnya tarikan dan tolakan listrik secara kuantitatif. Ia juga menyimpulkan hukum yang mengatur tarikan dan tolakan listrik tersebut. Hukum tersebut dikenal dengan *Hukum Coulomb*. Hukum Coulomb menyatakan bahwa

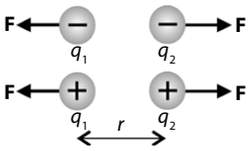
"Gaya tarik-menarik atau tolak-menolak antara dua buah muatan listrik besarnya berbanding lurus dengan hasil kali besar kedua muatan tersebut dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua muatan tersebut."

Perhatikan **Gambar 4.5** dan **Gambar 4.6**. Secara matematis, gaya tarik-menarik atau tolak-menolak (gaya Coulomb) dalam vakum dapat ditulis sebagai berikut.

$$E_p = \int_0^Q \frac{q}{C}\, dq \quad \text{atau} \quad F_{\text{vakum}} = k\frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad (4\text{–}1)$$



Gambar 4.5
Interaksi muatan listrik berlainan jenis akan tarik-menarik



Gambar 4.6
Interaksi muatan listrik sejenis akan tolak-menolak

Gaya Coulomb yang terjadi dalam suatu medium atau bahan memiliki persamaan gaya Coulomb sebagai berikut.

$$F_{\text{bahan}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{q_1\, q_2}{r^2} \qquad (4\text{–}2)$$

Jika Persamaan (4–1a) dan Persamaan (4–1b) digabungkan, didapat:

$$\frac{F_{\text{vakum}}}{F_{\text{bahan}}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon r \qquad (4\text{–}3a)$$

Sehingga didapat hubungan gaya Coulomb pada bahan dan gaya Coulomb pada vakum sebagai berikut.

$$F_{\text{bahan}} = \frac{1}{\varepsilon r} F_{\text{vakum}} \qquad (4\ \text{–}3b)$$

Keterangan:
F = gaya Coulomb (N)
q = muatan listrik (C)
$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ = konstanta dielektrik ($k = 9 \times 10^9$ Nm^2/C^2)
ε_0 = permitivitas ruang hampa ($\varepsilon_0 = 8{,}85 \times 10^{-12}$ C^2/Nm^2)
ε_r = permitivitas relatif bahan
r = jarak antarmuatan (m)

Contoh 4.1

Dua keping logam yang terbuat dari bahan sama diberi muatan sama besar.
a. Berapakah muatan di setiap keping jika diketahui gaya Coulomb sebesar 2 N dan jarak antarkeping logam 1,5 m?
b. Jika kedua keping berada di dalam bahan/medium dengan $\varepsilon_r = 4$, berapakah besar gaya Coulombnya?

Jawab:
Diketahui:
$F = 2$ N;
$r = 1{,}5$ m

a. $F = k\,\frac{q_1 q_2}{r^2}$ dengan $q_1 = q_2 = q$

$$q^2 = \frac{Fr^2}{k} \rightarrow q = \sqrt{\frac{Fr^2}{k}}$$

$$q = r\sqrt{\frac{F}{k}} = 1{,}5\ \text{m}\sqrt{\frac{2\ \text{N}}{9\times10^9\ \text{Nm}^2\text{C}^2}} = 2{,}24 \times 10^{-5}\text{C} = 22{,}4\ \mu\text{C}$$

Tugas Anda 4.1

Anda masih ingat alat yang dinamakan dengan elektroskop? Apakah fungsi alat tersebut? Bagaimanakah cara kerjanya? Coba Anda cari informasi dari internet atau buku-buku referensi.

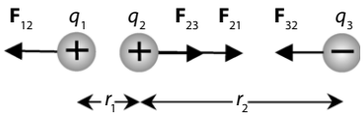
$q_1 = q_2 = q = 22{,}4\ \mu C$

Jadi, besar muatan listrik di setiap keping adalah 22,4 μC.

b. $F_{bahan} = \frac{1}{\varepsilon_r} \times F_{vakum} = \left(\frac{1}{4}\right)(2\ N) = \frac{1}{2} N$

Jadi, besar gaya Coulombnya adalah $\frac{1}{2}$ N.

2. Resultan Gaya Coulomb



Gambar 4.7
Resultan gaya Coulomb

Perhatikan **Gambar 4.7**. Gambar tersebut dapat dideskripsikan sebagai berikut. F_{12} adalah gaya Coulomb yang dialami muatan q_1 akibat pengaruh muatan q_2. F_{21} adalah gaya Coulomb yang dialami muatan q_2 akibat pengaruh muatan q_1. F_{23} adalah gaya Coulomb yang dialami muatan q_2 akibat pengaruh muatan q_3. F_{32} adalah gaya Coulomb yang dialami muatan q_3 akibat pengaruh muatan q_2.

Resultan gaya Coulomb di suatu titik dirumuskan sebagai berikut.

$$F_R = F_1 + F_2 + F_3 + ... = \sum F_n \qquad (4\text{–}4)$$

Berarti, resultan gaya Coulomb yang dialami muatan q_2 pada **Gambar 4.7** adalah:

$$F_{q_2} = F_{21} + F_{23}$$

Dalam hal ini, $F_{21} = k\frac{q_1 q_2}{r_1^2}$ dan $F_{23} = k\frac{q_2 q_3}{r_2^2}$.

Contoh 4.2

Tiga buah partikel berada pada satu garis lurus, setiap partikel bermuatan $+3\mu C$, $-5\mu C$, dan $+2\mu C$. Antarpartikel berjarak sama, yaitu 10 cm.

a. Tentukan besar arah gaya pada partikel bermuatan $-5\mu C$.

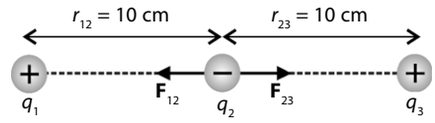
b. Di mana partikel $-5\mu C$ diletakkan agar gaya Coulomb pada partikel tersebut nol?

Jawab:

Diketahui: $q_1 = 3\mu C$; $q_2 = -5\mu C$; $q_3 = 2\mu C$

a. Letak muatan q_1, q_2, dan q_3 seperti gambar berikut.

Jarak antara kedua partikel sama besar yaitu $r_{12} = r_{23} = 10$ cm. Adapun F_{12} merupakan gaya Coulomb hasil interaksi tarik-menarik q_1 dan q_2, sedangkan F_{23} merupakan gaya Coulomb hasil interaksi tarik menarik q_2 dan q_3. Dengan memprediksikan $F_{12} > F_{23}$, maka resultan gaya Coulombnya memenuhi persamaan berikut.



$$F = F_{12} - F_{23} = k\frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} - k\frac{q_2 q_3}{r_{23}^2}$$

$$F = \frac{k q_2}{r^2}(q_1 - q_3)$$

$$= \frac{(9\times10^9\ Nm^2/C^{-2})(5\times10^{-6} C)}{(0{,}1\ m)^2}(3\times10^{-6} C - 2\times10^{-6} C) = 4{,}5\ N$$



Tokoh

Charles Coulomb
(1736– 1806)



Coulomb adalah ahli Fisika kelahiran Angouleme, Prancis. Dia merupakan orang pertama yang menunjukkan perilaku bahwa muatan listrik saling tolak satu sama lain. Namanya kemudian digunakan sebagai satuan muatan listrik.

Sumber: *Jendela IPTEK*, 1995

b. Agar nilai resultan gaya Coulomb di q_2 sama dengan nol, maka besar F_{12} harus sama dengan F_{23} sehingga persamaannya menjadi:

$$F_{12} = F_{23} \rightarrow \frac{k q_1 q_2}{r_{12}^2} = \frac{k q_2 q_3}{r_{23}^2} \rightarrow \frac{r_{23}^2}{r_{12}^2} = \frac{q_3}{q_1}$$

$$\frac{r_{23}}{r_{12}} = \sqrt{\frac{2}{3}} = 0{,}816 \rightarrow r_{23} = 0{,}816\, r_{12}$$

Misalkan, muatan q_2 diletakkan x m dari muatan q_1, maka:
$r_{12} = x$ m dan $r_{23} = (0{,}2 - x)$ m
$r_{23} = 0{,}816\, r_{12} \rightarrow 0{,}2 - x = 0{,}816\,(x) \rightarrow x = 9{,}08$ m

Jadi, agar gaya Coloumb pada q_2 sama dengan nol, muatan q_2 diletakkan 9,08 m dari muatan q_1.

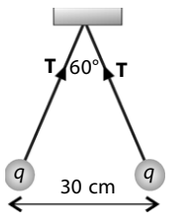
Kata Kunci

- proton
- elektron
- neutron
- atom netral
- gaya Coulomb

Contoh 4.3

Dua buah partikel masing-masing bermuatan 5μC digantung pada tali, seperti pada gambar. Jika tali dianggap tidak bermassa, tentukan besarnya:

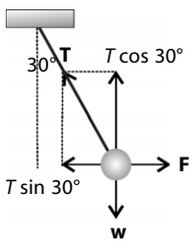
a. tegangan tali T;
b. massa setiap partikel jika $g = 10$ m/s^2.



Jawab:

Diketahui: $q_1 = q_2 = q_3 = 5 \times 10^{-6}$ C;
$g = 10$ m/s^2; $k = 9 \times 10^9$ Nm^2/C^2.

Jika gaya-gaya yang bekerja pada partikel-partikel tersebut digambarkan akan terlihat seperti gambar berikut.



Anda dapat menentukan besar tegangan tali T dan massa m hanya dengan meninjau setengah bagian dari sistem.

a. Sistem dikatakan dalam keadaan setimbang jika:
$\Sigma F_x = 0$ atau $F = T \sin 30°$

Dari **Persamaan (4–1)** diketahui bahwa $F = \frac{k q^2}{r^2}$ maka

akan diperoleh $T \sin 30° = \frac{k q^2}{r^2}$

$$\frac{1}{2} T = \frac{\left(9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2\right)\left(5 \times 10^{-6} \text{C}\right)^2}{(0{,}3 \text{ m})^2}$$

$T = 5$ N

b. $\sum F_y = 0$ dan $T \cos 30° = m g$

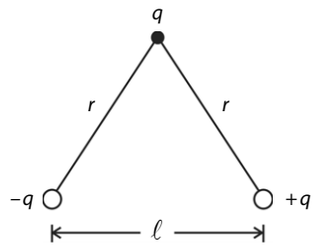
$$\frac{1}{2}\sqrt{3}\ (5 \text{ N}) = m\ 10 \text{ m/s}^2 \rightarrow m = 0{,}43 \text{ kg}$$

Jadi, massa setiap partikel adalah 0,43 kg.



Tantangan untuk Anda

Perhatikan gambar berikut.

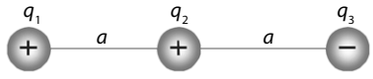


Hitunglah resultan gaya F yang bekerja pada muatan q.

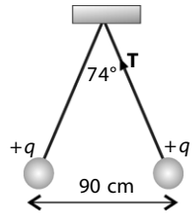
Tes Kompetensi Subbab A

Kerjakanlah dalam buku latihan.

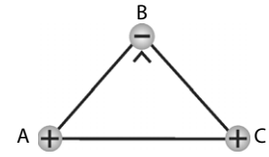
1. Berapakah besar gaya tarik-menarik antara proton dan elektron dalam sebuah atom hidrogen yang berjari-jari atom 0,5 Å ($0{,}5 \times 10^{-10}$ m)?
2. Perhatikan gambar berikut.



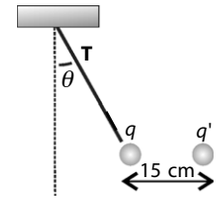
 Jika diketahui $q_1 = q_2 = 5\ \mu C, q_3 = -2\ \mu C$, dan $a = 0{,}1$ m, tentukan resultan gaya Coulomb pada q_2.
3. Tiga buah partikel berada dalam satu garis lurus, masing-masing bermuatan $-12\ \mu C$, $8\ \mu C$, dan $-6\ \mu C$. Antarpartikel memiliki jarak yang sama 0,2 m.
 a. Tentukan besar dan arah gaya pada partikel bermuatan $8\ \mu C$.
 b. Di mana partikel yang bermuatan $+8\ \mu C$ diletakkan agar gaya Coulomb pada partikel tersebut bernilai nol?
4. Dua buah partikel masing-masing bermuatan $18\ \mu C$ digantung pada tali isolator seperti gambar berikut.



 Tali dianggap tidak bermassa. Tentukan besarnya:
 a. tegangan tali T;
 b. massa setiap partikel jika $g = 10$ m/s^2.
5. Bagaimanakah jarak antara dua partikel bermuatan harus diubah agar gaya tolak keduanya menjadi:
 a. 4 kali semula; b. $\frac{1}{4}$ kali semula.
6. Muatan A yang besarnya $4\ \mu C$ diletakkan pada garis hubung antara muatan B yang besarnya $-2\ \mu C$ dan muatan C yang besarnya $6\ \mu C$. Muatan A terletak 3 cm dari B dan 5 cm dari C. Jika jarak BC = 4 cm, tentukan besarnya resultan gaya yang bekerja pada:
 a. muatan B;
 b. muatan C.



7. Sebuah benda bermassa 40 g dan bermuatan $q = 0{,}5\ \mu C$ digantungkan pada seutas tali ringan yang massanya dapat diabaikan. Tepat di sebelah kanan benda, pada jarak 15 cm, diletakkan $q' = -1\ \mu C$ yang menyebabkan posisi benda menjadi seperti pada gambar berikut.



 Jika $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \times 10^9$ Nm^2/C^2 dan $g = 10$ m/s^2, tentukanlah:
 a. besar sudut θ, dan
 b. besar tegangan pada tali.

B. Medan Listrik

Anda mungkin pernah mendengar bahwa setiap muatan yang diletakkan di suatu daerah akan memiliki medan listrik di sekitarnya. Jika sebuah muatan uji (q') diletakkan pada daerah tersebut, muatan tersebut akan mengalami gaya Coulomb. Kuat medan listrik di suatu titik didefinisikan sebagai gaya Coulomb per satuan muatan yang dialami oleh sebuah muatan di titik tersebut. Secara matematis, dituliskan sebagai berikut.

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q'} \qquad (4\text{–}5)$$

dengan $F = \frac{kqq'}{r^2}$

maka

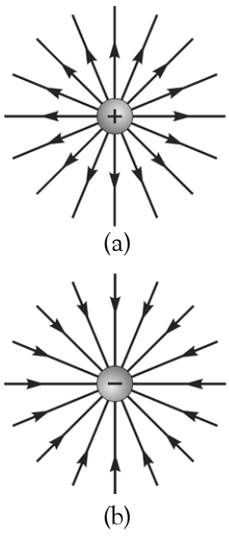
$$E = k\frac{q}{r^2} \text{ atau } E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2} \qquad (4\text{–}6)$$

Keterangan:
E = kuat medan listrik (N/C)
q = muatan listrik (C)
r = jarak antarmuatan (m)
$k = 9 \times 10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2$

1. Garis-Garis Gaya

Untuk menggambarkan medan listrik dapat juga dilukiskan dalam bentuk garis-garis gaya (*lines of force*). Hubungan antara garis-garis gaya dan vektor medan listrik adalah sebagai berikut.

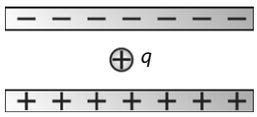
a. Vektor kuat medan di suatu titik pada garis gaya menyinggung garis gaya di titik tersebut.
b. Banyaknya garis per satuan luas penampang (yang tegak lurus dengan garis-garis tersebut) adalah sebanding dengan besarnya medan listrik E.



Gambar 4.8
(a) Garis-garis gaya listrik untuk partikel bermuatan positif;
(b) Garis-garis gaya listrik untuk partikel bermuatan negatif;
(c) Garis-garis gaya untuk dua muatan yang sejenis;
(d) Garis-garis gaya untuk dua muatan yang berbeda jenis.

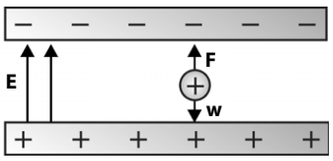
Contoh 4.4

Partikel bermuatan $+4\ \mu$C dan bermassa 1 mg terapung bebas dalam medan listrik, seperti pada gambar berikut.



Jika $g = 10\ \text{m/s}^2$, tentukanlah besarnya kuat medan listrik yang memengaruhi partikel tersebut.

Jawab:
Diketahui:
$m = 1\ \text{mg} = 10^{-6}\ \text{kg}$
$g = 10\ \text{m/s}^2$
$q = 4\ \mu\text{C} = 4 \times 10^{-6}\ \text{C}$
Perhatikan gambar berikut.

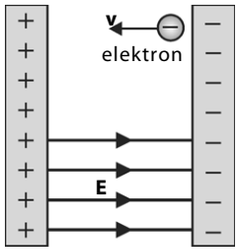


Dalam keadaan setimbang,
$F = w$
$qE = mg$

$$E = \frac{mg}{q} = \frac{(10^{-6}\ \text{kg})(10\ \text{m/s}^2)}{4 \times 10^{-6}\ \text{C}} = 2{,}5\ \text{N/C}$$

Contoh 4.5

Perhatikan gambar berikut.



Sebuah elektron ($e = -1{,}6 \times 10^{-19}$ C, $m = 9 \times 10^{-31}$ kg) bergerak tanpa kecepatan awal dari pelat bermuatan negatif menuju pelat positif yang berjarak 32 cm dalam medan listrik homogen $E = 0{,}45$ N/C. Hitunglah:
a. percepatan yang dimiliki elektron;
b. waktu yang diperlukan mencapai pelat positif;
c. laju elektron saat tiba di pelat positif.

Jawab:
Oleh karena massa elektron sangat kecil, gaya berat mg dapat diabaikan terhadap gaya Coulomb $F = qE$.
Diketahui:
$q = e = -1{,}6 \times 10^{-19}$ C;
$m = 9 \times 10^{-31}$ kg;
$d = 32$ cm $= 0{,}32$ m;
$E = 0{,}45$ N/C

a. Dari Hukum II Newton diperoleh:
$\Sigma F = ma \rightarrow qE = ma$

$$a = \frac{qE}{m} = \frac{(-1{,}6\times10^{-19}\,\text{C})(0{,}45\,\text{N/C})}{9\times10^{-31}\,\text{kg}} = -8\times10^{10}\,\text{m/s}^2$$

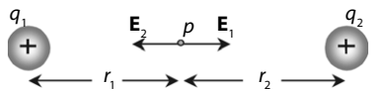
(tanda negatif menunjukkan percepatan yang dialami elektron)

b. Waktu tempuh elektron diperoleh dari persamaan GLBB, yaitu $s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$
dengan $v_0 = 0$; $s = d$

$d = \frac{1}{2} at^2 \rightarrow 0{,}32$ m $= \frac{1}{2}(8 \times 10^{10}\,\text{m/s}^2)\, t^2$
$t = 2 \times 10^{-6}$ sekon.

c. Laju elektron saat menyentuh pelat positif diperoleh dengan persamaan:
$v_t^2 = v_0^2 + 2as$
$= 0 + 2\,(8 \times 10^{10}\,\text{m/s}^2)\,(0{,}32\,\text{m})$
$v_t = 2{,}26 \times 10^5$ m/s

2. Resultan Kuat Medan Listrik



Gambar 4.9
Titik p dipengaruhi oleh muatan q_1 dan q_2.

Medan listrik merupakan besaran vektor. Oleh karena itu, penjumlahannya mengikuti aturan penjumlahan vektor. Anda dapat menggambar vektor-vektor medan listrik di sekitar muatan statis yang menunjukkan besar dan arah medan listrik pada titik-titik di sekitar muatan tersebut. Resultan besar kuat medan di titik p adalah sebagai berikut.

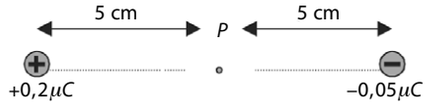
$$E = E_1 + E_2 + \ldots = \Sigma E_n \qquad (4\text{–}7)$$

Keterangan:
E_1 = kuat medan listrik di titik p akibat muatan q_1
E_2 = kuat medan listrik di titik p akibat muatan q_2

Medan listrik merupakan besaran vektor. Oleh karena itu, untuk menghitung resultan dari medan listrik dapat dilakukan dengan cara metode analisis (menggunakan vektor satuan) atau dengan menggunakan metode grafik. Metode grafik dapat dilakukan dengan syarat setiap medan listrik diketahui arah vektornya.

Contoh 4.6

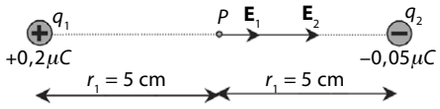
Perhatikan gambar berikut.



Tentukan:
a. kuat medan listrik di titik P;
b. gaya pada muatan -4×10^{-8} C di titik P.

Jawab:

a. Perhatikan gambar berikut.



Muatan uji P biasanya dianggap bermuatan positif.
E_1 = kuat medan listrik akibat q_1
E_2 = kuat medan listrik akibat q_2

$$E_1 = k\frac{q_1}{r_1^2} \text{ dan } E_2 = k\frac{q_2}{r_2^2}$$

$$E_p = \left[k\frac{q_1}{r_1^2} + k\frac{q_2}{r_2^2}\right]. \text{ Oleh karena } r_1 = r_2 = r \text{ maka}$$

$$E_p = \frac{k}{r^2}(q_1 + q_2) = \frac{9\times10^9\,\text{Nm}^2/\text{C}^2}{(5\times10^{-2}\,\text{m})^2}\times(20\times10^{-8}\,\text{C} + 5\times10^{-8}\,\text{C})$$

$$= \frac{9\times10^9\,\text{Nm}^2/\text{C}^2}{(5\times10^{-2}\,\text{m})^2}\times25\times10^{-8}\,\text{C} = 9\times10^5\,\text{N/C}$$

Jadi, kuat medan listrik di titik P adalah 9×10^5 N/C.

b. Muatan P (-4×10^{-8}C) mengalami gaya sebagai berikut.

$F_p = E_p \times q = (9 \times 10^5\,\text{N/C})\ (-4 \times 10^{-8}\text{C}) = -0{,}036\,\text{N}$

Tanda negatif menunjukkan F_p arahnya ke kiri.

Contoh 4.7

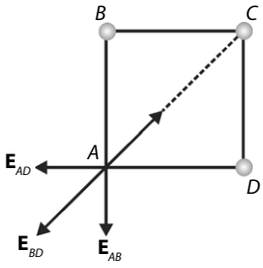
Pada titik-titik sudut B dan D sebuah persegi $ABCD$ masing-masing diletakkan sebuah partikel bermuatan $+q$. Agar kuat medan listrik di titik A = nol, tentukan besar muatan yang harus diletakkan di titik C.

Jawab:

Oleh karena $q_B = q_D = q$ dan $AB = AD = r$, maka

$$E_{AB} = E_{AD} = k\frac{q}{r^2}$$

Kuat medan di titik A oleh muatan di B dan D adalah



$$E_{BD} = \sqrt{E_{AB}^2 + E_{AD}^2} = \sqrt{\frac{k^2q^2}{r^4} + \frac{k^2q^2}{r^4}}$$

Agar $E_A = 0$, E_{AC} harus sama besar, tetapi berlawanan arah dengan E_{BD}.
Untuk itu q_C harus bermuatan negatif.

$$E_A = E_{BD} - E_{AC}$$

$$0 = k\frac{q}{r^2}\sqrt{2} - k\frac{q_C}{AC^2}$$

$$k\frac{q_C}{(r\sqrt{2})^2} = k\frac{q}{r^2}\sqrt{2}$$

$$\frac{q_C}{2r^2} = \frac{q}{r^2}\sqrt{2}$$

$$q_C = 2\sqrt{2}q \text{ (negatif)}$$

Jadi, besar muatan yang harus diletakkan di titik C adalah $2\sqrt{2}q$.

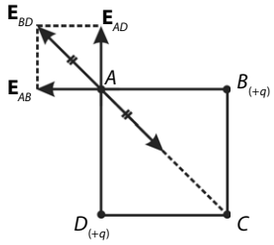
Pembahasan Soal

Pada titik-titik sudut B dan D sebuah bujur sangkar ABCD masing-masing diletakkan sebuah partikel bermuatan $+q$. Agar kuat medan listrik di titik A = nol, maka di titik C harus diletakkan sebuah partikel bermuatan sebesar

a. $-q$
b. $+q$
c. $-q\sqrt{2}$
d. $+q\sqrt{2}$
e. $-2q\sqrt{2}$

UMPTN 1991

Pembahasan:



$$E_{AB} = E_{AD} = \frac{kq}{q^2} = E$$

$$E_{BD} = \sqrt{E^2_{AB} + E^2_{AD}} = \sqrt{2E^2}$$

$$E_{BD} = E\sqrt{2} = \frac{kq}{q^2}\sqrt{2}$$

$$E_{AC} = E_{BD}$$

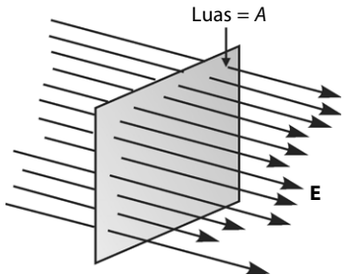
$$\frac{k(-q_C)}{(AC)^2} = \frac{kq}{q^2}\sqrt{2}$$

$$\frac{-q_C}{\left(q\sqrt{2}\right)^2} = \frac{q}{q^2}\sqrt{2}$$

$$\frac{-q_C}{2q^2} = \frac{q}{q^2}\sqrt{2}$$

$$q_C = -2q\sqrt{2}$$

Jawaban: e



Gambar 4.10
Garis-garis gaya yang menembus bidang permukaan.

3. Hukum Gauss

Hukum Gauss didasarkan pada konsep *fluks*. Fluks adalah kuantitas yang menggambarkan berapa banyak vektor medan/garis-garis gaya yang menembus suatu permukaan dalam arah tegak lurus. Perhatikan **Gambar 4.10**.

Jika terdapat garis-garis gaya dari suatu medan listrik homogen yang menembus tegak lurus suatu bidang seluas A, jumlah garis medan yang menembus tegak lurus bidang tersebut sama dengan perkalian E dan A. Perkalian antara E dan A ini dinamakan *fluks listrik* (Φ). Secara matematis dituliskan sebagai berikut.

$$\Phi = EA \qquad (4\text{–}8)$$

Keterangan:
Φ = fluks listrik (Nm^2/C atau weber)
E = kuat medan listrik (N/C)
A = luas bidang yang ditembus medan listrik (m^2)

Jika garis-garis gaya tersebut menembus bidang tidak secara tegak lurus, fluks listriknya adalah:

$$\Phi = EA\cos\theta \qquad (4\text{–}9)$$

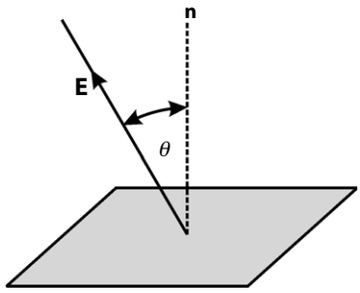
dengan θ adalah sudut antara vektor medan dan luas permukaan yang ditembus medan listrik.

Dari konsep fluks listrik inilah, Gauss mengemukakan hukumnya yang dinyatakan sebagai berikut.

"Jumlah garis gaya yang keluar dari suatu permukaaan tertutup sebanding dengan jumlah muatan listrik yang dilingkupi oleh permukaan tertutup tersebut".

Secara matematis ditulis

$$\Phi_{\text{permukaan tertutup}} = \frac{q}{\varepsilon_0} \qquad (4\text{–}10)$$

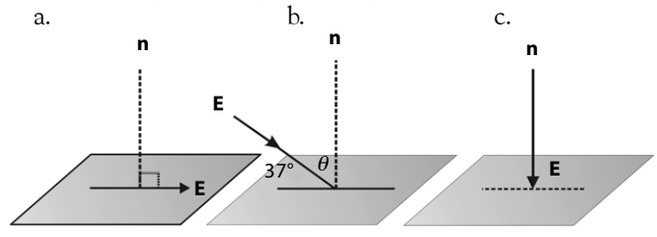


Gambar 4.11
Garis gaya yang menembus suatu permukaan membentuk sudut θ.

Contoh 4.8

Hitunglah fluks listrik pada suatu bidang persegi yang berukuran 20×15 cm, jika kuat medan listrik homogen sebesar 150 N/C dan arahnya:
a. sejajar bidang;
b. membentuk sudut 37° terhadap bidang;
c. tegak lurus terhadap bidang.

Jawab:
Diketahui:
Luas bidang persegi $A = (20\text{ cm} \times 15\text{ cm}) = 300\text{ cm}^2 = 3 \times 10^{-2}\text{ m}^2$;
Kuat medan listrik $E = 150$ N/C.
Fluks listrik dapat Anda perhatikan pada gambar berikut.



a. Untuk sudut $\theta = 90°$:
$\Phi = EA\cos 90° = 150\text{ N/C}\ (3 \times 10^{-2}\text{ m}^2)\ (0) = 0.$

b. Untuk sudut $\theta = 53°$:
$\Phi = EA\cos 53° = 150\,\text{N/C}\,(3 \times 10^{-2}\,\text{m}^2)\,(0{,}6) = 2{,}7\,\text{Wb}$.

c. Untuk sudut $\theta = 0°$:
$\Phi = EA\cos 0° = 150\,\text{N/C}\,(3 \times 10^{-2}\,\text{m}^2)\,(1) = 4{,}5\,\text{Wb}$.

4. Perhitungan Medan Listrik dengan Menggunakan Hukum Gauss

a. Medan Listrik pada Keping Sejajar

Medan listrik di antara pelat sejajar dapat dihitung dengan mudah menggunakan Hukum Gauss. Dua buah pelat keping yang memiliki luas A masing-masing diberi muatan sama tersebar merata, tetapi berlawanan jenis, yaitu $+q$ dan $-q$ seperti pada **Gambar 4.12**. Rapat muatan σ tiap keping didefinisikan sebagai muatan q per satuan luas A. Secara matematis, dituliskan sebagai berikut.

$$\sigma = \frac{q}{A} \qquad (4\text{–}11)$$

Kuat medan listrik E pada pelat konduktor ditentukan berdasarkan konsep Hukum Gauss. Caranya dengan membuat suatu permukaan tertutup, seperti silinder untuk memudahkan perhitungan. Perhatikan **Gambar 4.13**.

Berdasarkan **Persamaan (4–9)**, fluks listrik pada silinder tertutup tersebut adalah

$$\Phi_{\text{silinder tertutup}} = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3$$
$$= EA_1\cos 0° + EA_2\cos 90° + EA_3\cos 0°$$

Oleh karena $A_1 = A_2 = A_3 = A$ maka

$$\Phi_{\text{silinder tertutup}} = EA + 0 + EA = 2EA$$

Berdasarkan **Persamaan (4–10)**, didapatkan persamaan

$$\Phi_{\text{silinder tertutup}} = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

sehingga

$$2EA = \frac{q}{\varepsilon_0} \Leftrightarrow E = \frac{q}{2\varepsilon_0 A}$$

Oleh karena $\frac{q}{A} = \sigma$ (rapat muatan) maka kuat medan listrik E yang ditimbulkan oleh satu pelat konduktor dinyatakan dengan persamaan

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} \qquad (4\text{–}12)$$

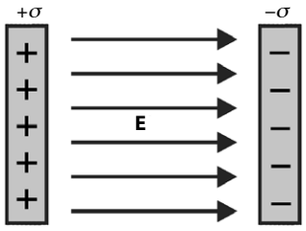
Dengan demikian, besarnya kuat medan listrik yang ditimbulkan oleh dua pelat konduktor dinyatakan dengan persamaan

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \qquad (4\text{–}13)$$

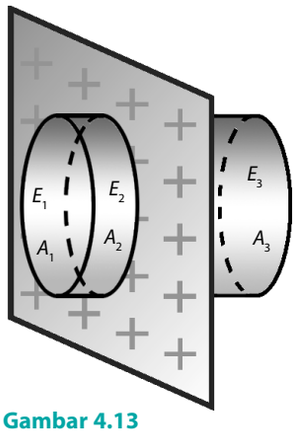
Keterangan:
σ = rapat muatan (C/m^2)
ε_0 = permitivitas ruang hampa ($8{,}85 \times 10^{-12}\ \text{C}^2/\text{Nm}^2$)

Kata Kunci

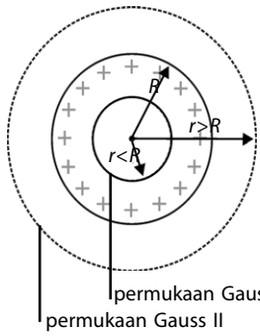
- medan listrik
- garis-garis gaya
- fluks
- fluks listrik
- keping sejajar
- bola konduktor
- permukaan Gauss



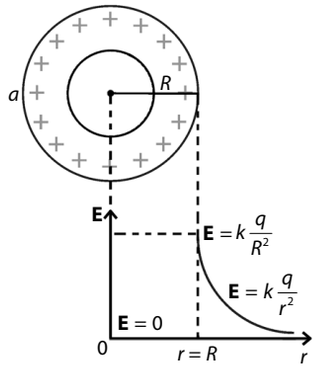
Gambar 4.12
Medan listrik antara dua keping sejajar dengan rapat muatan $+\sigma$ dan $-\sigma$.



Gambar 4.13
Perhitungan kuat medan listrik E pada pelat konduktor menggunakan permukaan tertutup (silinder) berdasarkan Hukum Gauss.



Gambar 4.14
Bola konduktor berongga yang memiliki jari-jari *R*. *r* = jarak titik ke pusat bola.



Gambar 4.15
Grafik *E* terhadap *r* untuk bola konduktor berongga.

b. Kuat Medan Listrik pada Bola Konduktor Berongga

Perhatikan **Gambar 4.14**. Jika ke dalam konduktor bola berongga yang berjari-jari R diberi sejumlah muatan positif atau muatan negatif, muatan tersebut akan tersebar merata hanya di permukaan bola. Adapun di dalam bola tidak terdapat muatan listrik. Berdasarkan Hukum Gauss dapat ditentukan besar medan listrik di dalam maupun di luar bola, yang besarnya

$$EA = \frac{q}{\varepsilon_0} \text{ atau } E = \frac{q}{A\varepsilon_0} \qquad (4\text{–}14)$$

Di bagian dalam bola dengan $r < R$, besarnya medan listrik $E = 0$. Hal tersebut disebabkan besarnya muatan yang dilingkupi permukaan Gauss I, $q = 0$. Adapun untuk permukaan Gauss II dengan $r > R$, besarnya muatan listrik yang dilingkupi permukaan Gauss II sama dengan jumlah muatan listrik pada bola tersebut. Dengan demikian, medan listrik E di permukaan Gauss II adalah

$$E = \frac{q}{4\pi r^2 \varepsilon_0} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2} = k\frac{q}{r^2}$$

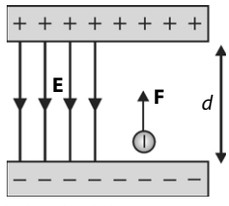
Kuat medan listrik di luar bola dapat diperoleh dengan menganggap bola sebagai muatan listrik yang terletak di pusat bola. Jadi, secara keseluruhan medan listrik di sekitar bola berongga adalah

- di dalam bola, $E = 0$ karena $q = 0$
- di permukaan bola, $E = k\frac{q}{R^2}$
- di luar permukaan bola, $E = k\frac{q}{r^2}$

Tes Kompetensi Subbab B

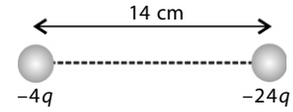
Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Sebuah elektron ditembakkan dengan kecepatan awal 15×10^5 m/s searah dengan kuat medan listrik yang besarnya 5×10^2 N/C. Tentukanlah:
 a. kapan elektron akan berhenti;
 b. jarak yang ditempuhnya.
2. Perhatikan gambar berikut.

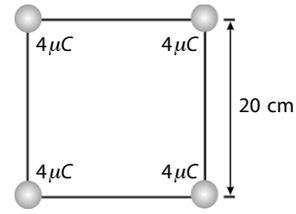


Sebuah elektron ($e = -1{,}6 \times 10^{-19}$ C, $m = 9 \times 10^{-31}$ kg) dilepaskan tanpa kecepatan awal dari sisi pelat keping bermuatan negatif dan dipercepat menuju pelat positif. Jika jarak antara pelat 24 cm dan medan listrik E = 225 N/C, tentukanlah:
 a. besar percepatan elektron;
 b. waktu yang diperlukan elektron untuk mencapai pelat positif;
 c. laju elektron saat tiba di pelat positif.

3. Dua buah partikel bermuatan terletak pada satu garis lurus, seperti pada gambar berikut.



Jika jarak antara partikel 14 cm, di manakah letak titik yang kuat medan magnetiknya nol?
4. Pada keempat sudut sebuah persegi diletakkan empat buah muatan yang sama ($4\mu C$), seperti gambar berikut.



Tentukan kuat medan listrik di pusat persegi jika:
 a. keempat muatan itu positif;
 b. tanda (positif dan negatif) keempat muatan itu berselang-seling.

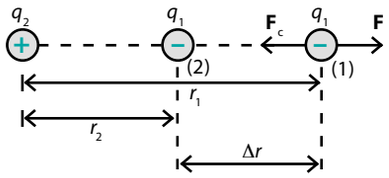
5. Hitung fluks listrik yang menembus bidang persegi (sisi = 20 cm) jika kuat medan listrik sebesar 100 N/C yang arahnya:
 a. sejajar dengan bidang;
 b. tegak lurus bidang;
 c. membentuk sudut 60° terhadap bidang.

6. Sebuah elektron diletakkan di pusat sebuah keping logam bermuatan negatif. Elektron tersebut dipercepat menuju keping logam positif di dekatnya sebesar $4{,}0 \times 10^{15}$ m/s^2. Jika kedua keping memiliki rapat muatan yang sama, tentukan nilai rapat muatannya? ($m_e = 9{,}1 \times 10^{-31}$ kg, $q_e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C, $\varepsilon_0 = 8{,}85 \times 10^{-12}$ C^2/Nm^2).

C. Energi Potensial Listrik dan Potensial Listrik

1. Energi Potensial Listrik

Perhatikan **Gambar 4.16**. Sebuah muatan uji q_1 didekatkan dengan muatan q_2. Akibatnya, terjadi interaksi antara muatan q_1 dan q_2 berupa gaya coulomb yang arahnya tolak-menolak. Untuk berpindah dari posisi r_1 ke posisi r_2, muatan q_1 harus melakukan usaha. Besarnya usaha yang harus dilakukan adalah sebanding dengan besarnya gaya Coulomb dan perpindahannya.



Gambar 4.16
Interaksi antara muatan q_1 dan q_2.

$$\Delta W = -F\Delta T \qquad (4-15)$$

Tanda negatif menunjukkan usaha melawan gaya Coulomb. Jika usaha yang dilakukan q_1 melalui perpindahan yang sangat kecil maka usaha q_1 dapat diperoleh dengan cara:

$$dW = -F\,dr$$

$$W = \int -F\,dr$$

$$W_{12} = \int_{r_1}^{r_2} -\frac{k\,q_1\,q_2}{r^2}\,dr$$

$$W_{12} = \frac{k\,q_1\,q_2}{r}\Bigg|_{r_1}^{r_2}$$

$$W_{12} = k\,q_1\,q_2\left[\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right] \qquad (4-16)$$

Sesuai dengan definisinya, usaha adalah proses transfer energi atau besarnya perubahan energi atau dalam bentuk matematisnya seperti berikut.

$$W = \Delta E_p = E_{p_2} - E_{p_1} \qquad (4-17)$$

Dapat kita simpulkan bahwa persamaan energi potensial di suatu titik adalah

$$E_p = \frac{k\,q_1\,q_2}{r} \qquad (4-18)$$

Keterangan:
W = usaha listrik (joule)
F = gaya Coulomb (N)
k = konstanta Coulomb = 9×10^9 Nm/C^2
q_1 = muatan uji (C)
q_2 = muatan sumber (C)
r = jarak antara q_1 dan q_2 (m)

2. Potensial Listrik

Potensial listrik adalah besarnya energi potensial listrik per satuan muatan. Pada **Gambar 4.16**, potensial listrik yang dimiliki oleh q_1 adalah sebagai berikut.

$$V = \frac{E_{p_1}}{q_1} = k\frac{q_1\, q_2}{q_1\, r_1} = \frac{k\, q_2}{r_1} \qquad (4\text{–}19)$$

Secara umum, persamaan potensial listrik di suatu titik yang berjarak r dari muatan sumber Q adalah

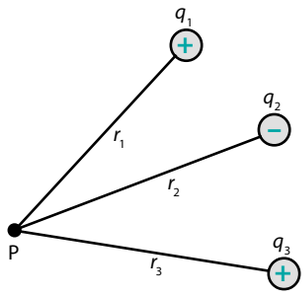
$$V = \frac{k\, Q}{r} \qquad (4\text{–}20)$$

Jika muatan listrik yang mengakibatkan munculnya potensial listrik jumlahnya lebih dari satu, potensial listrik di sebuah titik merupakan jumlah aljabar potensial terhadap setiap muatan listrik. Besarnya muatan potensial di titik p yang disebabkan oleh muatan titik q_1, q_2, ..., q_n adalah

$$V_p = \sum V_n = k\sum \frac{q_n}{r_n} \qquad (4\text{–}21)$$

Perhatikan **Gambar 4.17**. Jika hanya ada 3 muatan, potensial listrik di titik P adalah

$$V_p = k\left[\frac{q_1}{r_1} - \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3}\right] \qquad (4\text{–}22)$$



Gambar 4.17
Potensial listrik oleh 3 muatan, q_1, q_2, q_3 di titik P.

3. Hubungan Usaha dan Beda Potensial Listrik

Perhatikan **Gambar 4.18**. Usaha yang dilakukan untuk memindahkan muatan q_1 dari posisi r_1 ke posisi r_2 dari arah muatan adalah

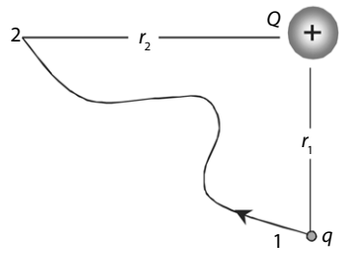
$$W_{12} = \Delta E_p = E_{p_2} - E_{p_1}$$

$$W_{12} = \frac{k\, q\, Q}{r_2} - \frac{k\, q\, Q}{r_1}$$

$$W_{12} = q\left(\frac{k\, Q}{r_2} - \frac{k\, Q}{r_1}\right)$$

$$W_{12} = q\left(V_2 - V_1\right) \qquad (4\text{–}23)$$

dengan $(V_2 - V_1)$ adalah beda potensial listrik antara titik 1 dan titik 2.



Gambar 4.18
Muatan q, bergerak dari titik 1 ke titik 2 dipengaruhi muatan Q.

Contoh 4.9

Sebuah muatan positif ($q = 1{,}6 \times 10^{-9}$ C) digerakkan menuju sebuah inti atom yang bermuatan Q. Jarak pisah awal kedua partikel tersebut adalah 2×10^{-11} m dan jarak pisah akhirnya adalah $1{,}5 \times 10^{-11}$ m. Jika usaha yang diperlukan untuk memindahkan $1{,}44 \times 10^{-17}$ J, tentukan muatan inti atom tersebut.

Jawab:
Diketahui:
$q \quad = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C; $\quad r_1 \quad = 2 \times 10^{-11}$ m;
$r_2 \quad = 1{,}5 \times 10^{-11}$ m; $\quad W_{12} = 1{,}44 \times 10^{-17}$ J.

dengan **Persamaan (4–21)** diperoleh $W_{12} = kqQ\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right)$

$1{,}44 \times 10^{-17}\,\text{J} = (9 \times 10^9)\,(1{,}6 \times 10^{-19}\,\text{C})\,(Q)\left(\frac{1}{1{,}5\times10^{-11}} - \frac{1}{2\times10^{-11}\,\text{m}}\right)$

$Q = 6 \times 10^{-19}\,\text{C}$

Jadi, muatan inti atom adalah 6×10^{-19} C.



Tantangan untuk Anda

Hitunglah usaha yang diperlukan untuk memindahkan muatan positif yang besarnya 10 C dari suatu titik yang potensialnya 10 V ke suatu titik yang potensialnya 60 V.

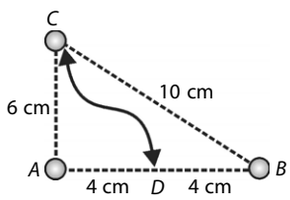
Contoh 4.10

Segitiga ABC siku-siku di A dengan $AB = 8$ cm dan $AC = 6$ cm. Sebuah muatan listrik $q' = -10^{-10}$ C akan dipindahkan dari titik C ke titik D yang terletak pada pertengahan AB. Jika muatan $q_A = 10^{-10}$ C dan muatan $q_B = -10^{-10}$ C, anggap kehadiran q' tidak berpengaruh terhadap potensial di D, tentukanlah:

a. potensial di C (V_C) olah q_A dan q_B;
b. potensial di D (V_D) olah q_A dan q_B;
c. usaha yang diperlukan untuk memindahkan muatan q' dari C ke D.

Jawab:

Diketahui: $q_A = +10^{-10}$ C; $q_B = -10^{-10}$ C;
$q' = -10^{-10}$ C; $BC = 10$ cm $= 0{,}1$ m.



a. Potensial listrik di C akibat q_A dan q_B adalah

$$V_C = V_{CA} + V_{CB} = k\frac{q_A}{AC} + k\frac{q_B}{BC}$$

$$= 9 \times 10^9\,\text{Nm}^2/\text{C}^2\left(\frac{10^{-10}\,\text{C}}{6\times10^{-6}\,\text{m}} + \frac{-10^{-10}\,\text{C}}{10\times10^{-2}\,\text{m}}\right) = 24\ \text{volt}.$$

b. Potensial listrik di D akibat muatan q_A dan q_B.
Oleh karena $q_A = -q_B$ dan $AD = BD$, maka $V_{DA} = -V_{DB}$ sehingga
$V_D = V_{DA} + V_{DB} = -V_{DB} + V_{DB} = 0$

c. Usaha untuk memindahkan muatan adalah
$W_{CD} = q'(V_D - V_C) = -10^{-10}\,\text{C}\,(0 - 24\ \text{V}) = 2{,}4 \times 10^{-9}$ joule.

4. Hukum Kekekalan Energi Mekanik dalam Medan Listrik

Hukum kekekalan energi mekanik pun berlaku pada gerak partikel, seperti gerak proton dan elektron di dalam medan listrik. Hal tersebut berlaku karena medan listrik merupakan medan konservatif.

Energi total sebuah partikel dengan massa m dan muatan q yang bergerak dalam medan listrik adalah

$$Ep_1 + Ek_1 = Ep_2 + Ek_2$$

atau

$$qV_1 + \frac{1}{2}mv_1^2 = qV_2 + \frac{1}{2}mv_2^2 \qquad (4\text{–}24)$$



Ingatlah

Hukum kekekalan energi mekanik partikel dalam medan listrik berlaku jika pada partikel tersebut tidak ada gaya lain yang bekerja selain gaya Coulomb.

Mengingat energi potensial listrik $Ep = qV$ dan energi kinetik $Ek = \frac{1}{2}mv^2$ jika kecepatan awal partikel $v_1 = 0$, **Persamaan (4–24)** menjadi

$$q\Delta V = \frac{1}{2}mv^2 \qquad (4\text{–}25)$$

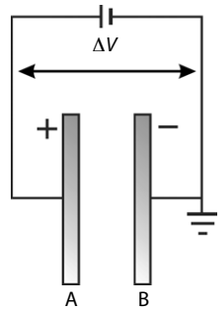
Persamaan (4–25) menunjukkan perubahan energi potensial menjadi energi kinetik.

Kata Kunci

- energi potensial listrik
- potensial listrik
- volt

Contoh 4.11

Perhatikan gambar berikut.



Beda potensial di antara dua pelat sejajar pada gambar tersebut adalah 150 V. Sebuah proton awalnya di keping A. Jika di antara kedua pelat hampa udara, hitung kecepatan proton sebelum menyentuh keping B. Massa proton $m = 1{,}6 \times 10^{-27}$ kg; muatan proton $q = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C.

Jawab:

Melalui Hukum Kekekalan Energi Mekanik dalam medan listrik diperoleh

Energi mekanik di A = energi mekanik di B

$$qV_A + \frac{1}{2}mv_A^2 = qV_B + \frac{1}{2}mv_B^2 \rightarrow \frac{1}{2}\left(v_A^2 - v_B^2\right) = q\left(V_B - V_A\right)$$

$$v_A^2 - v_B^2 = \frac{2q}{m}\left(V_B - V_A\right)$$

Berdasarkan besaran yang diketahui pada soal, dapat diperoleh

$$0 - v_B^2 = \frac{2\left(1{,}6\times10^{-19}\,\text{C}\right)}{1{,}6\times10^{-27}\,\text{kg}}(-150\text{V})$$

$$v_B^2 = 300\times10^8\,\text{m/s} = 10\sqrt{3}\times10^4\,\text{m/s}$$

Kecepatan proton sebelum menyentuh pelat B adalah $10\sqrt{3}\times10^4$ m/s .

5. Potensial di antara Dua Keping Sejajar

Jika dua buah keping sejajar dihubungkan dengan sumber tegangan (baterai) maka kedua keping akan memiliki muatan yang sama, tetapi berlawanan jenis. Usaha yang dilakukan gaya listrik $F = qE$ untuk memindahkan muatan-muatan sejauh d adalah sebesar

$$W = F\,d$$

Adapun dalam listrik statis besarnya usaha adalah

$$W = q\,\Delta V$$

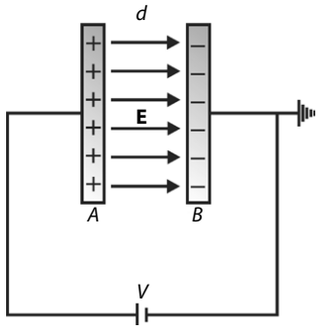
Dengan menggabungkan kedua persamaan usaha tersebut diperoleh

$$Fd = q\,\Delta V$$

$$qEd = q\,\Delta V$$

$$\Delta V = Ed$$

$$\boxed{V_2 - V_1 = Ed} \qquad (4\text{–}26)$$



Gambar 4.19
Dua buah keping sejajar dan terpisah sejauh d diberi muatan yang sama.

Keterangan:

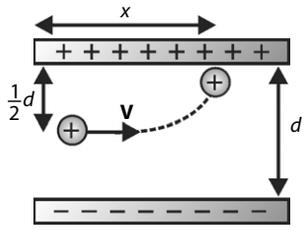
d = jarak antara kedua keping (m)

E = kuat medan listrik (V/m)

Beda potensial $\Delta V = V_2 - V_1$ dapat dinyatakan sebagai beda potensial V antara kedua keping sejajar.

Contoh 4.12

Sebuah elektron e ditembakkan masuk di antara dua keping sejajar dengan kecepatan awal v_0 seperti pada gambar berikut.



Jika beda potensial kedua keping adalah V dan jarak antara keping d, tentukan:

a. waktu yang diperlukan elektron hingga menyentuh keping sebelah atas;
b. jarak mendatar (x) yang ditempuh elektron, jika pengaruh percepatan gravitasi diabaikan.

Jawab:

Dari Hukum II Newton dan **Persamaan (4 – 5)**, diperoleh

$\Sigma F = ma \rightarrow qE = ma$

$q\frac{V}{d} = ma \rightarrow a = \frac{qV}{md}$ dengan arah ke atas.

a. Sesuai persamaan GLBB bahwa

$t = \sqrt{\frac{2s}{a}}$, sedangkan $a = \frac{qV}{md}$ maka untuk $s = \frac{1}{2}d$ akan diperoleh

$$t = \sqrt{\frac{d}{\frac{qV}{md}}} = d\sqrt{\frac{m}{qV}}$$

b. Dari persamaan $x = v_0 t$ dengan $x_0 = 0$, diperoleh

$$x = v_0\left(d\sqrt{\frac{m}{qV}}\right) = v_0 d\sqrt{\frac{m}{qV}}$$



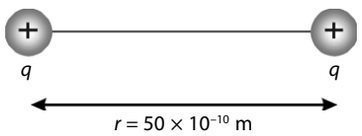
Tantangan untuk Anda

Sebuah elektron dengan massa $9{,}11 \times 10^{-31}$ kg dan muatan listrik $-1{,}6 \times 10^{-19}$ C, lepas dari katode menuju anode yang jaraknya 2 cm. Jika kecepatan awal elektron = 0 dan beda potensial antara anode dan katode = 200 V, hitunglah kecepatan elektron ketika sampai di anode.

Tes Kompetensi Subbab C

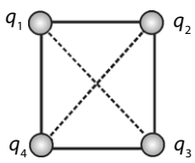
Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Perhatikan gambar berikut.



Jika diketahui $r = 50 \times 10^{-10}$ m dan $q = 5 \times 10^{-16}$ C dan sebuah proton terletak di titik B, tentukanlah energi potensial proton.

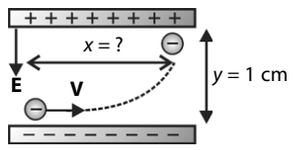
2. Dua muatan titik $q_1 = -2$ nC dan $q_2 = 4$ nC terpisah pada jarak 20 cm. Tentukan potensial di titik tengah garis hubung antara kedua muatan tersebut.
3. Empat buah muatan listrik q_1, q_2, q_3, dan q_4 terletak pada titik sudut persegi yang panjang sisinya 20 cm seperti pada gambar berikut.



Tentukan potensial titik di pusat persegi itu jika:

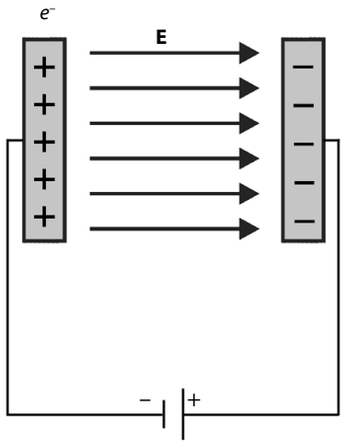
a. $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = 2\ \mu$C,
b. $q_1 = 2\ \mu$C, $q_2 = -4\ \mu$C, $q_3 = 6\ \mu$C, $q_4 = -5\ \mu$C.

4. Dua buah muatan titik pada koordinat Cartesius dengan koordinat sebagai berikut. $q_1 = +20\ \mu$C di titik (3, 4) dan $q_2 = -130\ \mu$C di titik (–5, 14). Tentukan potensial listrik di titik (0, 0).
5. Sebuah elektron ditembakkan dengan kecepatan 10^5 m/s masuk ke dalam dua keping seperti gambar. Jika kuat medan antara dua keping = 5×10^2 N/C, tentukan jarak mendatar x sampai elektron menumbuk keping yang atas. ($m_e = 9 \times 10^{-31}$ kg, $q_e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C, dan $g = 10$ m/s^2).



D. Kapasitor

1. Muatan pada Kapasitor



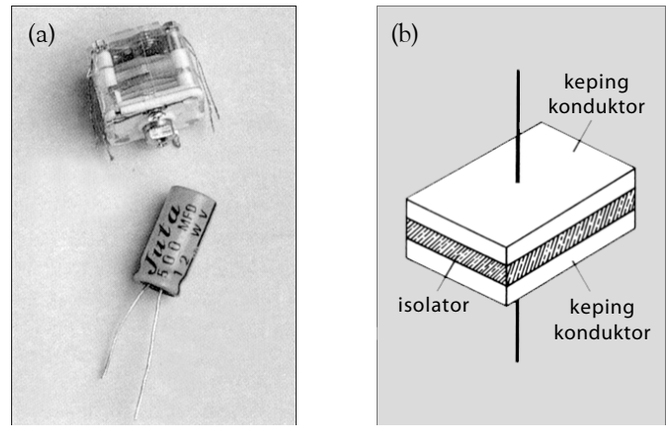
Gambar 4.20
Proses pengisian muatan pada kapasitor.

Pernahkah Anda memerhatikan komponen-komponen yang ada di dalam alat elektronik, seperti televisi dan radio? Kapasitor atau kondensator adalah salah satu komponen elektronik yang ada di dalamnya. Perhatikan **Gambar 4.20**, kapasitor atau kondensator adalah dua buah penghantar (pelat) konduktor yang dipisahkan oleh suatu *isolator* atau zat *dielektrik* untuk memperoleh muatan yang sama, tetapi berlawanan jenis. Kapasitor berfungsi untuk menyimpan energi potensial listrik.

Anda dapat membayangkan sebuah usaha untuk memberikan muatan pada kapasitor dengan cara kutub positif baterai menarik elektron pada keping sebelah kiri hingga keping tersebut menjadi bermuatan positif dan mendorong elektron-elektron tersebut ke keping sebelah kanan menjadi bermuatan negatif hingga kedua keping memiliki muatan sama, hanya jenisnya yang berbeda. Proses perpindahan elektron dari keping kiri ke keping kanan melalui energi Kimia dari baterai yang berlangsung terus-menerus sampai beda potensial V antara keping sama dengan beda potensial yang dimiliki baterai. Sampai akhirnya kapasitor telah penuh muatan dan tidak dapat diisi lagi.

Kapasitor disimbolkan dengan —||—. Kapasitor digunakan untuk:

a. menyimpan muatan atau energi listrik;
b. sebagai salah satu komponen dalam rangkaian penala yang berguna untuk memilih frekuensi pada pesawat radio; dan
c. mencegah loncatan listrik pada rangkaian-rangkaian yang mengandung kumparan jika tiba-tiba arus listrik diputuskan.



Gambar 4.21
(a) Jenis kapasitor;
(b) Skema kapasitor.

2. Kapasitas Kapasitor

Anda mungkin pernah melihat kapasitor terutama dalam peralatan elektronik. Jika sebuah kapasitor dihubungkan dengan sumber beda potensial yang berubah-ubah maka muatan yang tersimpan di dalamnya pun berubah-ubah.

$$\frac{q_1}{V_1} = \frac{q_2}{V_2} = \frac{q_3}{V_3} = \frac{q_n}{V_n} = \text{konstan}$$

Perbandingan q dan V tersebut dinamakan kapasitas kapasitor yang harganya konstan untuk tiap kapasitor sehingga dalam bentuk matematis ditulis sebagai berikut.

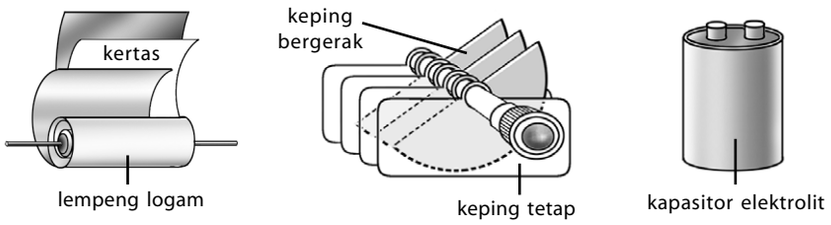
$$C = \frac{q}{V} \qquad (4\text{–}27)$$

Keterangan:
q = muatan (C)
V = beda potensial (V)
C = kapasitansi (C/V) atau (F)

Kapasitas kapasitor tidak dipengaruhi oleh perubahan muatan dan potensial listrik.

Ada tiga jenis kapasitor yang banyak digunakan, yaitu:

a. *Kapasitor kertas*. Kertas pada kapasitor ini berfungsi sebagai penyekat di antara kedua pelat logam;
b. *Kapasitor variabel*. Kapasitor ini digunakan dalam rangkaian penala pada pesawat radio;
c. *Kapasitor elektrolit (elco)*. Kapasitor jenis ini memiliki kapasitansi paling tinggi, yaitu sampai dengan 100.000 pF.



(a) (b) (c)

Gambar 4.22
(a) Kapasitor kertas;
(b) Kapasitor variabel;
(c) Kapasitor elektrolit.

Tugas Anda 4.2

Berdasarkan kepolarannya, dikenal dua jenis kapasitor, yaitu kapasitor polar dan kapasitor non-polar. Coba Anda cari informasi mengenai perbedaan di antara keduanya.

Contoh 4.13

Sebuah kapasitor diisi oleh baterai 4,5 volt sehingga bermuatan 0, 6 μC. Tentukanlah:
a. kapasitas kapasitor tersebut;
b. muatan yang tersimpan dalam kapasitor jika dimuati baterai 22 volt.

Jawab:
Diketahui: $V_1 = 4{,}5$ volt; $q_1 = 0{,}6 \times 10^{-6}$ C.

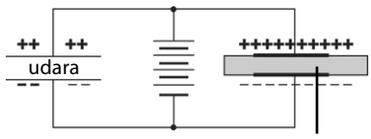
a. Kapasitas kapasitor dihitung dengan **Persamaan (4–27)**

$$C = \frac{q_1}{V_1} = \frac{(0{,}6\times10^{-6}\,\text{C})}{4{,}5\,\text{V}} = 2\times10^{-7}\ \text{F}$$

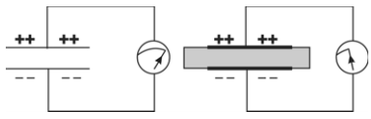
b. Muatan yang tersimpan diperoleh dengan persamaan
$q_2 = CV_2 = (2 \times 10^{-7}\,\text{F})\ (22\ \text{V}) = 4{,}4\ \mu\text{C}$.

3. Kapasitor Keping Sejajar

Pada 1837, **Michael Faraday** melakukan penelitian tentang pengaruh pengisian ruang di antara pelat-pelat kapasitor dengan menggunakan bahan dielektrik. **Faraday** menggunakan dua kapasitor yang identik. Di salah satu kapasitor ditempatkan suatu bahan dielektrik, sedangkan kapasitor lainnya berisi udara pada tekanan normal. Kemudian, kedua kapasitor tersebut diberi potensial listrik yang sama besarnya, seperti ditunjukkan oleh **Gambar 4.23**. Melalui eksperimen tersebut, **Faraday** memperoleh hasil spektakuler. Muatan di kapasitor yang mengandung dielektrik jauh lebih besar daripada muatan di kapasitor yang mengandung udara.



(a)



(b)

Gambar 4.23
(a) Baterai B menyebabkan perbedaan potensial yang sama pada setiap kapasitor; kapasitor dengan bahan dielektrik memiliki muatan yang lebih banyak. (b) Kedua kapasitor mengangkut muatan yang sama. Kapasitor dengan bahan dielektrik memiliki perbedaan potensial lebih rendah, seperti ditunjukkan oleh pembacaan alat ukur.

Oleh karena muatan q lebih besar untuk V yang sama pada kapasitor yang mengandung dielektrik. Berdasarkan persamaan $C = \frac{q}{V}$ diperoleh hasil bahwa kapasitas sebuah kapasitor akan bertambah besar akibat penempatan bahan dielektrik di antara pelat-pelat kapasitor.

Tabel 4.1
Sifat-sifat dari Beberapa Dielektrik*

Bahan	Konstanta Dielektrik	Kekuatan Dielektrik** (kV/mm)
Vakum	1,00000	∞
Udara	1,00054	0,8
Air	78	–
Kertas	3,5	14
Mika merah delima (Rubby mica)	5,4	160
Porselen	6,5	4
Kwarsa yang dilebur	3,8	8
Gelas pirex	4,5	13
Bakelit	4,8	12
Polietlen	2,3	50
Amber	2,7	90
Teflon	2,1	60
Neopren	6,9	12
Minyak transformator	4,5	12
Titanium dioksida	100	6
Polistiren	2,6	25

Sumber: *Fundamental of Physics*, 2001

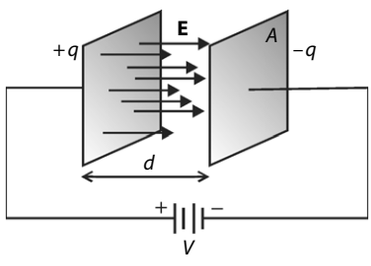
* Sifat-sifat ini adalah kira-kira pada temperatur kamar dan untuk kondisi-kondisi sedemikian rupa sehingga medan listrik E di dalam dielektrik tidak berubah dengan waktu.

** Inilah gradien potensial maksimum yang mungkin terdapat di dalam dielektrik tanpa terjadinya kegagalan listrik (*electrical breakdown*). Dielektrik seringkali ditempatkan di antara plat-plat penghantar untuk mengirimkan suatu perbedaan potensial yang lebih tinggi untuk dipakaikan di antara plat-plat tersebut daripada perbedaan potensial yang mungkin didapat dengan menggunakan udara sebagai dielektrik.

Perhatikan **Gambar 4.24**, kapasitor keping sejajar terdiri atas dua keping logam yang terpasang sejajar pada jarak pisah d meter, yang jauh lebih kecil dari luas keping A m^2. Kedua keping tersebut diberi muatan q yang sama besar, tetapi tidak sejenis.

Jika di antara keping sejajar adalah udara/vakum, kapasitansi kapasitor memenuhi persamaan berikut.

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \qquad (4\text{–}28)$$



Gambar 4.24
Kapasitor keping sejajar dihubungkan dengan sumber tegangan V.

Keterangan:
A = luas keping (m^2)
d = jarak antarkeping (m)
ε_0 = permitivitas vakum (udara) = 8,85 × 10^{-12} C^2/Nm^2

4. Dielektrik pada Kapasitor

Di antara dua pelat keping pada kapasitor biasanya disisipi/dipasang suatu bahan isolator yang disebut *dielektrik*. Bahan ini digunakan karena dapat memperbesar nilai kapasitas kapasitor. Contoh bahan dielektrik adalah kaca mika, kertas, dan karet.

Bahan dielektrik memiliki harga permitivitas yang berbeda dengan harga permitivitas vakum. Berdasarkan **Persamaan (4–28)** dapat diketahui bahwa permitivitas bahan $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ sehingga kapasitas kapasitor yang menggunakan bahan dielektrik adalah

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \text{ atau } C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d} \qquad (4\text{–}29)$$

Dengan memerhatikan **Persamaan (4–28)** dan **Persamaan (4–29)** didapat hubungan kapasitor tanpa dielektrik dan kapasitor dengan bahan dielektrik adalah sebagai berikut.

$$C = \varepsilon_r C_0 \qquad (4\text{–}30)$$

Tugas Anda 4.3

Mengapa dielektrik tidak menggunakan bahan konduktor? Coba tanya pada guru Anda atau cari informasi dari internet.

Contoh 4.14

Sebuah kapasitor keping sejajar, luas tiap keping = 400 cm^2 dan terpisah 2 mm satu sama lain. Beda potensial di antara keping = 2.000 volt. Kemudian, kapasitor dilepas dari sumber tegangan dan ruang di antara keping diisi dengan dielektrikyang memiliki permitivitas relatif bahan ε = 50. Hitunglah:

a. kapasitas mula-mula (C_0);
b. muatan q pada tiap keping;
c. kuat medan listrik E sebelum diberi bahan dielektrik;
d. kapasitas kapasitor C setelah disisipi bahan dielektrik;
e. permitivitas dielektrik yang digunakan (ε);
f. beda potensial keping V' setelah diberi bahan dielektrik;
g. kuat medan listrik E' setelah diberi muatan dielektrik.

Jawab:

Diketahui:

$\varepsilon_0 = 8{,}85 \times 10^{-12}\ C^2/Nm^2$;
$d = 2\ mm = 2 \times 10^{-3}\ m$;
$A = 400\ cm^2 = 4 \times 10^{-2}\ m^2$;
$V = 2.000\ V$;
$\varepsilon = 50$.

a. $C_0 = \varepsilon_0 \frac{A}{d} = (8{,}85 \times 10^{-12}) \left(\frac{4 \times 10^{-2}\ m^2}{2 \times 10^{-3}\ m^2} \right) = 17{,}7 \times 10^{-11}\ F$

b. $q = C_0 V = (17{,}7 \times 10^{-11}\ F)\ (2.000\ V) = 35{,}4 \times 10^{-8}\ C$

c. $E = \frac{V}{d} = \frac{2.000\ V}{2 \times 10^{-3}\ m} = 10^6\ V/m$

d. $\varepsilon_r = \frac{C}{C_0}$

$C = \varepsilon_r C_0 = 50\ (17{,}7 \times 10^{-11}\ F) = 8{,}85 \times 10^{-9}\ F$

e. $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 = 50\ (8{,}85 \times 10^{-12}\ C^2/Nm^2) = 4{,}425 \times 10^{-10}\ C^2/Nm^2$

Ingatlah

Jika permitivitas dielektrik disisipkan di antara keping kapasitor, kapasitas dan beda potensialnya berubah, tetapi muatannya (q) tetap.

f. $V' = \frac{q}{C} = \frac{35{,}4 \times 10^{-8}\,\text{C}}{8{,}85 \times 10^{-9}\,\text{F}} = 40\ \text{V}$

diperoleh $q' = q$ karena hubungan dengan baterai diputus sehingga tidak memiliki jalan lain.

g. $E' = \frac{V'}{d} = \frac{40\ \text{V}}{2 \times 10^{-3}\ \text{m}} = 20.000\ \text{V/m}$

5. Kapasitor Bentuk Bola

Perhatikan **Gambar 4.25**. Dua kulit konduktor berbentuk bola yang dipisahkan ruang vakum. Kulit bagian luar bermuatan negatif dengan jari-jari luar R_2, sedangkan kulit yang sebelah dalam bermuatan positif dengan jari-jari R_1. Potensial V_1, pada bola bagian dalam ditimbulkan oleh muatan positif $+q$ dan muatan bola bagian luar $-q$. Adapun potensial V_2 dari bola konduktor bagian luar bernilai nol karena ditanahkan $V_2 = 0$.

Kita ketahui bahwa kuat medan dan potensial listrik oleh bola konduktor di titik R_1 dan R_2 memiliki persamaan:

$$V_1 = k\frac{q}{R_1} \text{ dan } V_2 = k\frac{q}{R_2} \qquad (4\text{–}31)$$

Dengan demikian, beda potensial antara kedua bola konduktor bermuatan tersebut adalah

$$\Delta V = V_1 - V_2$$

$$\Delta V = kq\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \qquad (4\text{–}32)$$

$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ merupakan tetapan ke sebandingan, untuk ruang hampa $k = 9 \times 10^9\ \text{Nm}^2\text{C}^{-2}$. Dengan demikian, kapasitas C dari kapasitor bola adalah

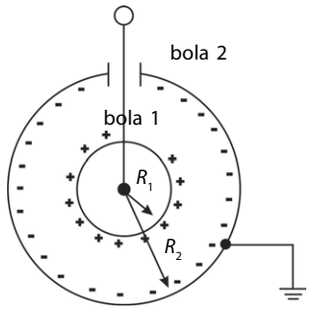
$$C = \frac{q}{V_{ab}} = \frac{q}{kq\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)} = \frac{R_1R_2}{k(R_2 - R_1)}$$

sehingga

$$C = 4\pi\varepsilon_0 \frac{R_1R_2}{(R_2 - R_1)} \qquad (4\text{–}33)$$

untuk kulit bola konduktor berongga di mana $R_1 = 0$ diperoleh

$$C = \frac{R}{k} \qquad (4\text{–}34)$$



Gambar 4.25
Kapasitor bola konsentris dengan V_2 dibumikan



Informasi untuk Anda



Sumber: *Physics for You*, 2001

Generator Van de Graaff adalah alat untuk mengumpulkan dan menyimpan muatan listrik statik dalam jumlah yang sangat besar. Rambut wanita ini akan saling tolak-menolak setelah memegang generator Van de Graaff dan ujung-ujungnya berdiri karena termuati oleh muatan yang sama.

Information for You

Van de Graff is a tool to collect and store statics electric charge enormously in quantity. The woman's hair could be repulsive each other after held the Van de Graff generator and a hair would be repulsives caused by loading the common charges.

6. Susunan Kapasitor

a. Susunan Seri

Dalam praktik, Anda sering kali perlu menggabungkan kapasitor untuk mendapatkan nilai kapasitas yang diinginkan. Cara penggabungan kapasitor yang sangat dasar adalah cara penggabungan dengan susunan seri dan paralel.

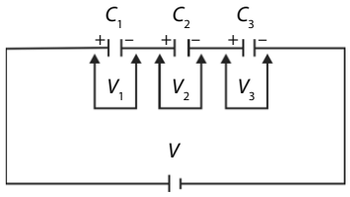
Perhatikan **Gambar 4.26**. Dalam susunan seri kapasitor berlaku aturan berikut.

1) Muatan pada setiap kapasitor sama, yaitu sama dengan muatan kapasitor pengganti.

$$q_{tot} = q_1 = q_2 = q_3 = q \qquad (4\text{–}35)$$

2) Beda potensial pada ujung-ujung kapasitor pengganti sama dengan jumlah total beda potensial ujung-ujung setiap kapasitor.

$$V_{tot} = V_1 + V_2 + V_3 \qquad (4\text{–}36)$$



Gambar 4.26
Susunan seri kapasitor

Dari **Persamaan (4–27)** diketahui bahwa

$$C = \frac{q}{V} \text{ atau } V = \frac{q}{C}$$

$$V_1 = \frac{q}{C_1},\ V_2 = \frac{q}{C_2},\ V_3 = \frac{q}{C_3},\ \text{sedangkan } V_{tot} = \frac{q}{C_{tot}}.$$

Jika harga-harga V_1, V_2, dan V_3 dimasukkan ke dalam **Persamaan (4–36)**, akan diperoleh persamaan

$$\frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \ldots \qquad (4\text{–}37)$$

Besar kapasitas pengganti untuk n buah kapasitator yang disusun seri adalah

$$\frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \ldots + \frac{1}{C_n} \qquad (4\text{–}38)$$

Tugas Anda 4.4

Ketika Anda sedang merangkai peralatan elektronik, kadang-kadang sulit menemukan nilai kapasitas kapasitor yang tepat dengan kebutuhan, maka teknik penyusunan kapasitor bermanfaat sekali dalam hal ini. Jika Anda hanya memiliki kapasitor bernilai besar, susunan kapasitor apakah yang akan Anda gunakan untuk mendapatkan kapasitor bernilai kecil?

Contoh 4.15

Tiga buah kapasitor yang kapasitasnya masing-masing 6 F, 9 F, dan 18 F disusun seri dan dihubungkan ke sumber tegangan 36 V. Hitunglah:

a. kapasitas pengganti;
b. muatan (q) dan beda potensial setiap kapasitor.

Jawab:

Diketahui: $C_1 = 6$ F; $C_2 = 9$ F; $C_3 = 18$ F; $V_{tot} = 36$ V; $\varepsilon = 50$;

a. Kapasitas kapasitor pengganti

$$\frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \rightarrow \frac{1}{6\text{ F}} + \frac{1}{9\text{ F}} + \frac{1}{18\text{ F}} = \frac{6}{18\text{ F}} \rightarrow C_{tot} = 3\text{F}$$

b. Muatan kapasitor diperoleh dengan menggunakan **Persamaan (4–27)**

$q_{tot} = C_{tot} V_{tot} = (3\text{ F})\ (36\text{ V}) = 108\text{ C}$

$q_{tot} = q_1 = q_2 = q_3 = 108\text{ C}$

sehingga tegangan setiap kapasitor adalah

$$V_1 = \frac{q_1}{C_1} = \frac{108\text{ C}}{6\text{ F}} = 18\text{V};\ V_2 = \frac{q_2}{C_2} = \frac{108\text{ C}}{9\text{ F}} = 12\text{V};\ V_3 = \frac{q_3}{C_3} = \frac{108\text{ C}}{18\text{ F}} = 6\text{V}$$

Ingatlah

- Kapasitas total dua buah kapasitor seri adalah

$$C_S = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

- Perbandingan potensial pada kapasitas seri adalah

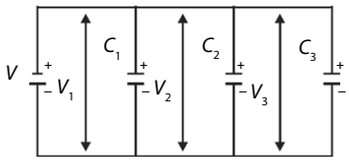
$$V_1 : V_2 : V_3 : \ldots : V_n = \frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2} : \frac{1}{C_3} : \ldots : \frac{1}{C_n}$$

b. Susunan Paralel

Dalam susunan paralel kapasitor, berlaku hal-hal berikut.

1) Beda potensial setiap kapasitor adalah sama

$$V_{tot} = V_1 = V_2 = V_3 = V \qquad (4\text{–}39)$$



Gambar 4.27
Susunan paralel kapasitor

2) Muatan total kapasitor pengganti sama dengan jumlah total muatan

$$q_{tot} = q_1 + q_2 + q_3 \qquad (4\text{–}40)$$

Perhatikan **Gambar 4.27**. Muatan pada masing-masing kapasitor adalah $q_1 = C_1V$, $q_2 = C_2V$, dan $q_3 = C_3V$, sedangkan $q = C_{total}\,V$. Jika harga-harga q_1, q_2, q_3, dan q dimasukkan ke dalam **Persamaan (4–35)**, akan diperoleh

$$C_{tot} = C_1 + C_2 + C_3 \qquad (4\text{–}41)$$

Besar kapasitas pengganti untuk n buah kapasitor yang disusun paralel adalah

$$C_{tot} = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots + C_n \qquad (4\text{–}42)$$

Contoh 4.16

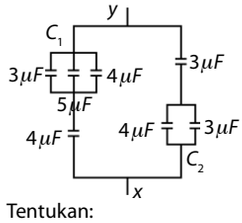
Tiga buah kapasitor yang kapasitasnya masing-masing 5 F, 15 F, dan 30 F disusun paralel dan dihubungkan ke sumber tegangan 300 volt. Hitunglah:
a. kapasitas total (C_{tot});
b. beda potensial setiap kapasitor;
c. muatan setiap kapasitor;
d. muatan total kapasitor.

Jawab:
Diketahui: $C_1 = 5$ F; $C_2 = 15$ F; $C_3 = 30$ F; $V_{tot} = 300$ V.
a. Kapasitas totalnya adalah $C_{tot} = C_1 + C_2 + C_3 = 5\text{ F} + 15\text{ F} + 30\text{ F} = 50\text{ F}$.
b. Pada susunan paralel benda potensial di setiap kapasitor sama juga dengan potensial totalnya sehingga $V_{tot} = V_1 = V_2 = V_3 = 300$ V
c. muatan di setiap kapasitor adalah
$q_1 = C_1\,V_1 = 5\text{ F} \times 300\text{ V} = 1.500\text{ C}$
$q_2 = C_2\,V_2 = 15\text{ F} \times 300\text{ V} = 4.500\text{ C}$
$q_3 = C_3\,V_3 = 30\text{ F} \times 300\text{ V} = 900\text{ C}$
d. Muatan total kapasitor adalah $q_{tot} = q_1 + q_2 + q_3 = 1.500\text{ C} + 4.500\text{ C} + 9.000\text{ C} = 15.000\text{ C}$



Tantangan untuk Anda

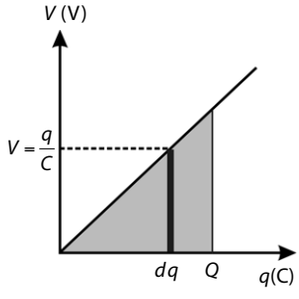
Perhatikan gambar rangkaian kapasitor berikut.



Tentukan:
a. kapasitas pengganti antara titik *x* dan titik *y*,
b. beda potensial antara titik *x* dan *y* jika muatan pada kapasitor 5 μF adalah 60 μC.

7. Energi yang Tersimpan dalam Kapasitor

Kapasitor juga berfungsi untuk menyimpan energi potensial yang diberikan dari sumber potensial listrik. Energi potensial tersebut digunakan ketika rangkaian listrik mulai bekerja. Sejumlah muatan ke dalam kapasitor terus bertambah selama proses pengisian terus berlangsung bersamaan dengan pertambahan potensial pada kedua keping sejajar hingga penuh sebesar $V = \frac{q}{C}$.



Gambar 4.28
Grafik perubahan potensial (*V*) sebagai fungsi perubahan muatan selama proses pengisian berlangsung.

Kenaikan total energi potensial pada kapasitor E_p adalah penjumlahan atau integral muatan $q(e^-)$ dari nol sampai Q (perhatikan **Gambar 4.28**). Dengan memerhatikan **Persamaan 4–19**, energi potensial yang tersimpan dalam kapasitor dapat diperoleh sebagai berikut.

$$d\,E_p = V\,d\,q = \frac{q}{C}d\,q$$

$$E_p = \int_0^Q \frac{q}{C}\,d\,q$$

$$E_p = \frac{1}{2}\,\frac{Q^2}{C} \qquad (4\text{–}43)$$

Contoh 4.17

Dua buah kapasitor masing-masing kapasitasnya $4\mu F$ dan $6\mu F$ disusun secara seri, kemudian dihubungkan dengan tegangan 110 V. Tentukan:

a. kapasitas total;

b. energi yang tersimpan dalam sistem.

Jawab:

Diketahui: $C_1 = 4\mu F$; $C_2 = 6\mu F$; 110 V.

a. $\frac{1}{C_{total}} = \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{6}\right) = \left(\frac{3+2}{12}\right)\frac{1}{\mu F} = \frac{5}{12}\frac{1}{\mu F}$

$\frac{1}{C_{total}} = \frac{5}{12}\frac{1}{\mu F}$

$C_{total} = 2,4\mu F$

b. $W = \frac{1}{2}C_{total}V^2 = \frac{1}{2}\left(\frac{12}{5}\times 10^{-6}\,\text{F}\right)(110\,\text{V})^2 = 1,452\times 10^{-2}\,\text{J}$

Kata Kunci

- kapasitas kapasitor
- kapasitor kertas
- kapasitor variabel
- kapasitor elektrolit
- farad
- kondensator
- isolator
- dielektrik
- katode
- anode

Mari Mencari Tahu

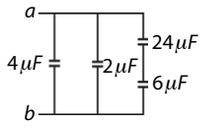


Anda telah mengetahui generator van der Graaf dari **Informasi untuk Anda**. Alat tersebut menghasilkan muatan sejenis dalam jumlah besar. Tugas Anda adalah mencari informasi mengenai cara kerja alat tersebut disertai dengan gambar. Pahami fungsi-fungsi setiap bagian dalam alat tersebut. Jika telah selesai, presentasikan di depan kelas.

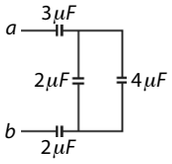
Tes Kompetensi Subbab D

Kerjakanlah dalam buku latihan.

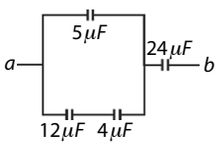
1. Tiga buah kapasitor yang kapasitasnya masing-masing 4 μF, 6 μF, dan 8 μF disusun seri lalu dihubungkan ke sumber tegangan 24 volt. Hitunglah:
 a. kapasitas kapasitor pengganti;
 b. muatan (q) dan beda potensial setiap kapasitor.
2. Tiga buah kapasitor dengan kapasitas masing-masing 3 F, 4 F, dan 8 F dihubungkan secara paralel, kedua ujungnya dihubungkan dengan sumber tegangan 100 volt. Hitunglah.
 a. kapasitas total;
 b. beda potensial setiap kapasitor;
 c. muatan setiap kapasitor;
 d. muatan total kapasitor.
3. Tentukan kapasitas pengganti antara a dan b dari muatan totalnya dari kapasitor yang dipasang seperti pada gambar berikut, jika dihubungkan ke sumber tegangan 24 volt.



(a)

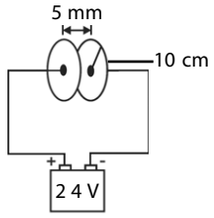


(b)



(c)

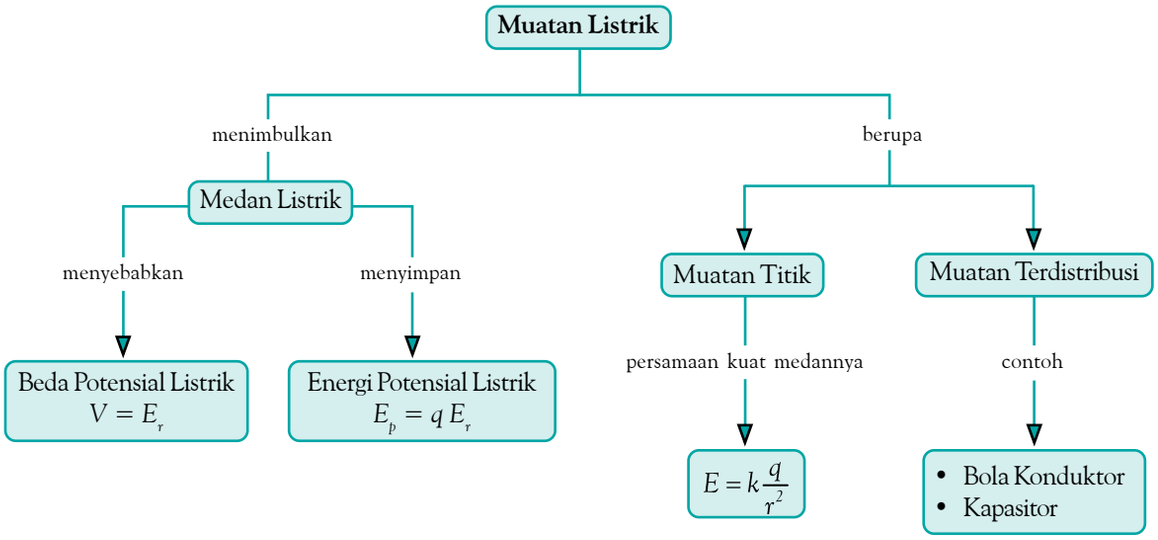
4. Sebuah kapasitor 40 μF dihubungkan dengan sebuah sumber tegangan 240 V hingga terisi penuh. Kemudian, kutub-kutubnya dihubungkan ke kapasitor 20 μF yang tidak bermuatan. Hitunglah:
 a. muatan total;
 b. beda potensial pada ujung-ujung setiap kapasitor;
 c. energi akhir total;
 d. pengurangan energi ketika kapasitor saling berhubungan.
5. Sebuah kapasitor keping sejajar berbentuk lingkaran dengan radius 10 cm dan jarak antara keping 5 mm. Jika dihubungkan ke baterai 24 V, hitunglah:
 a. besar kapasitasnya;
 b. besar muatan pada keping kapasitor;
 c. energi potensial yang tersimpan dalam kapasitor.



Rangkuman

1. Muatan listrik terdiri atas proton yang bermuatan positif, elektron yang bermuatan negatif, dan neutron yang tidak bermuatan.
2. Jika dua muatan yang berlainan jenis berinteraksi, akan terjadi gaya tarik-menarik antara kedua muatan tersebut. Sebaliknya, jika dua muatan listrik sejenis berinteraksi akan terjadi gaya tolak-menolak.
3. Hukum Coulomb menyatakan bahwa besar gaya tarik-menarik atau tolak-menolak antara dua muatan listrik berbanding lurus dengan hasil kali besar kedua muatan dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua muatan tersebut.
$$F_C = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$
dengan k = konstanta Coulomb.
4. Kuat medan listrik di suatu titik didefinisikan sebagai gaya Coulomb per satuan muatan yang dialami oleh sebuah muatan di titik tersebut.
$$E = \frac{F}{q'}$$
5. Hukum Gauss menyatakan bahwa jumlah garis gaya yang keluar dari suatu permukaan tertutup sebanding dengan jumlah muatan listrik yang dilingkupi oleh permukaan tertutup tersebut.
$$\phi_{\text{permukaan tertutup}} = \frac{q}{E_0}$$
6. Kuat medan listrik E yang ditimbulkan oleh sebuah pelat konduktor dinyatakan dengan persamaan
$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$
dengan r = rapat muatan
7. Kuat medan listrik di sekitar bola berongga adalah
 a. di dalam bola $E = 0$, karena $q = 0$
 b. di permukaan bola $E = k\frac{q}{R^2}$
 c. di luar permukaan bola $E = k\frac{q}{r^2}$
8. Beda potensial listrik di titik i karena pengaruh muatan Q dinyatakan dengan persamaan
$$V_i = k\frac{Q}{r_1}$$
9. Usaha untuk memindahkan sebuah muatan listrik q_1 dari satu titik ke titik lainnya dinyatakan dengan
$$W_{1\to 2} = q(V_1 - V_2)$$
10. Kapasitor adalah komponen listrik yang berfungsi untuk menyimpan muatan dan energi potensial listrik. Kapasitor merupakan dua pelat konduktor yang dipindahkan oleh suatu isolator atau zat dielektrik.
11. Kapasitas kapasitor adalah kemampuan suatu kapasitor untuk memperoleh atau menyimpan muatan listrik.
$$C = \frac{q}{V}$$
dengan: C = kapasitansi (Farad)
q = muatan (C)
V = beda potensial (Volt)
12. Besarnya kapasitas kapasitor dengan bahan dielektrik dinyatakan dengan persamaan
$$C_0 = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$
dengan ε_r = perbandingan antara permitivitas bahan (ε) dan permitivitas vakum (ε_0).
13. Jika n buah kapasitor disusun seri, besar muatan pada setiap kapasitor adalah sama.
$$q_{tot} = q_1 = q_2 = q_3 = \ldots = q$$
Beda potensial pada ujung-ujung kapasitor pengganti sama dengan jumlah total beda potensial kapasitor.
$$V_{tot} = V_1 + V_2 + V_3 + \ldots + V_n$$
Besar kapasitas kapasitor pengganti untuk n buah kapasitor yang disusun seri adalah
$$\frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \ \ldots \ + \frac{1}{C_n}$$
14. Jika n buah kapasitor disusun paralel, besar beda potensial pada setiap kapasitor adalah sama.
$$V_{tot} = V_1 = V_2 = V_3 = V$$
Besar muatan total kapasitor pengganti sama dengan besar muatan total kapasitor.
$$q_{tot} = q_1 + q_2 + q_3$$
Besar kapasitas kapasitor pengganti untuk n buah kapasitor yang disusun paralel adalah
$$C_{tot} = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots + C_n$$
15. Besar energi listrik (W) yang tersimpan dalam kapasitor adalah
$$W = \frac{1}{2}qV = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C}$$

Peta Konsep



Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, Anda tentu menjadi paham tentang listrik statis, medan listrik, potensial listrik, energi potensial listrik, kapasitor dan jenis-jenisnya, serta bagaimana cara kapasitor bekerja. Dari semua materi pada bab ini, bagian mana yang menurut Anda sulit untuk dipahami? Coba Anda diskusikan dengan teman atau guru Fisika Anda.

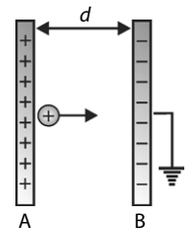
Pemasangan kapasitor pada sakelar-sakelar listrik yang memiliki daya tinggi dapat menghilangkan terjadinya percikan bunga api. Pemanfaatan ini berguna sekali untuk keamanan. Coba Anda tuliskan manfaat lain penggunaan kapasitor.

Tes Kompetensi Bab 4

Kerjakanlah pada buku latihan.

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat.

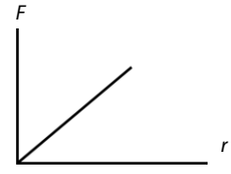
1. Bola A dan B masing-masing muatan 10 C dan 30 C. Jarak antarbola adalah 3 m. Jika kedua bola tersebut berada di udara maka
 a. energi potensial bola B 9×10^{11} joule
 b. energi potensial bola B 3×10^{11} joule
 c. E_p bola A $= \frac{1}{2} E_p$ bola B
 d. E_p bola A : E_p bola B $= 1 : 3$
 e. energi potensial bola A $= 9 \times 10^{10}$ joule
2. Diketahui 4 buah benda titik yang bermuatan, yaitu A, B, C, dan D. Jika A menarik B, A menolak C, dan C menarik D, sedangkan D bermuatan negatif, pernyataan yang benar adalah
 a. muatan B positif muatan C negatif
 b. muatan B positif muatan C positif
 c. muatan B negatif muatan C positif
 d. muatan B negatif, muatan C negatif
 e. muatan A positif, muatan C negatif
3. Satuan medan listrik dapat dinyatakan dalam
 a. N/C^2
 b. V/m
 c. N/m^2
 d. J/N
 e. N/C
4. Dua buah keping sejajar diberi muatan yang sama besar dan berlawanan jenis. Kuat medan listrik di antara dua keping tersebut
 a. berbanding lurus dengan rapat muatannya
 b. berbanding terbalik dengan rapat muatannya
 c. berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antarkeping
 d. berbanding lurus dengan jarak kedua keping
 e. arahnya menuju ke keping yang bermuatan positif
5. Sebuah elektron dalam suatu medan listrik tidak mengalami gaya jika elektron tersebut
 a. bergerak dalam arah tegak lurus terhadap medan listrik
 b. bergerak sejajar dengan arah medan listrik
 c. bergerak dengan arah sembarang
 d. bergerak melingkar
 e. tidak bergerak
6. Dua muatan titik sejenis dan sama besar $q_a = q_b = 0{,}01\ \mu C$ berada pada jarak 10 cm satu sama lain. Jika $k = 9 \times 10^9\ Nm^2/C^2$, besar gaya tolak yang dialami kedua muatan tersebut adalah
 a. 90 N
 b. 9×10^3 N
 c. 9×10^{-5} N
 d. 9×10^{-9} N
 e. 9×10^7 N
7. Perhatikan gambar berikut.



Proton yang bergerak dari keping *A* ke keping *B* seperti tampak pada gambar tersebut memiliki kecepatan 2×10^5 m/s. Jika jarak antara keping dalam vakum $d = 1$ cm, massa proton $1{,}6\ 10^{-27}$ kg, muatan proton $1{,}6 \times 10^{-19}$C, beda potensial keping sejajar tersebut adalah
 a. 50 V
 b. 100 V
 c. 200 V
 d. 320 V
 e. 400 V

(UMPTN 1995)

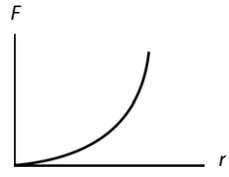
8. Dua buah benda bermuatan $-q$ dan $+q$ berjarak r satu sama lain. Jika jarak r diubah-ubah maka grafik hubungan gaya Coulomb dengan r adalah
 a.



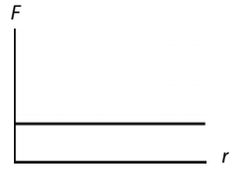
 b.



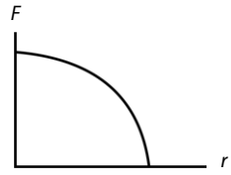
 c.



 d.

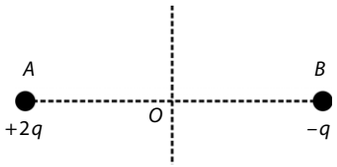


 e.



9. Sebuah kapasitor 50 μF dihubungkan dengan sumber tegangan hingga dapat menyimpan energi sebesar 0,36 joule. Besar muatan yang tersimpan dalam kapasitor tersebut adalah ... coulomb.
 a. $3{,}6 \times 10^{-3}$
 b. $6{,}0 \times 10^{-3}$
 c. $3{,}6 \times 10^{-2}$
 d. $6{,}0 \times 10^{-2}$
 e. $2{,}4 \times 10^{-1}$

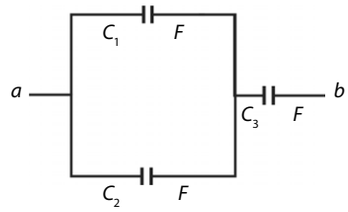
10. Perhatikan gambar berikut.



Jika R adalah letak titik yang resultan kuat medan listriknya nol maka R adalah
 a. tepat di titik O
 b. antara titik A dan O
 c. antara titik O dan B
 d. pada perpanjangan AB dengan RA = $\sqrt{2}$ RB
 e. pada perpanjangan BA dengan RB = $\sqrt{2}$ RA

11. Pada kapasitor yang berkapasitansi C diberikan muatan sebesar q sehingga beda potensialnya V. Besar energi dalam kapasitor
 a. $\frac{1}{2} qV^2$
 b. $\frac{1}{2} CV$
 c. $\frac{1}{2} VC^2$
 d. $\frac{1}{2} q^2/CV$
 e. $\frac{1}{2} q^2/C$

12. Perhatikan gambar berikut.



Jika kapasitor ketiga kapasitansinya sama, kapasitor pengganti antara ujung a dan b adalah ... F (farad).
 a. 3 CF
 b. 2 CF
 c. $\frac{1}{2}$ CF
 d. $\frac{2}{3} CF$
 e. $\frac{3}{2} CF$

13. Dua buah kapasitor masing-masing memiliki kapasitas 2 μF dan 4 μF disusun seri. Kapasitor penggantinya
 a. $\frac{1}{8}$ μF
 b. $\frac{4}{3}$ μF
 c. $\frac{3}{4}$ μF
 d. $\frac{1}{2}$ μF
 e. 6 μF

14. Sebuah kapasitor pelat sejajar tanpa dielektrik berkapasitas 10 μF . Jika bahan kapasitor tersebut diisi dengan dielektrik mika yang memiliki konstanta dielektrik $k = 5$, kapasitansinya sekarang menjadi
 a. 2 μF
 b. 15 μF
 c. 4 μF
 d. 30 μF
 e. 10 μF

15. Perbandingan gaya Coulomb dan gaya gravitasi antara 2 buah elektron dalam ruang vakum adalah ...
 a. $4{,}2 \times 10^{42}$ N
 b. $2{,}4 \times 10^{40}$ N
 c. $2{,}4 \times 10^{42}$ N
 d. $4{,}2 \times 10^{40}$ N
 e. sama besar

16. Usaha untuk membawa sebuah elektron dari kutub baterai 12 volt ke kutub negatifnya adalah
 a. $1{,}92 \times 10^{-10}$ joule
 b. $1{,}6 \times 10^{-19}$ joule
 c. $1{,}92 \times 10^{-19}$ joule
 d. $1{,}6 \times 10^{-18}$ joule
 e. $1{,}92 \times 10^{-18}$ joule

17. Kapasitor 1,2 μF diberi muatan hingga 3 kilovolt. Besar energi yang tersimpan dalam kapasitor adalah
 a. 5,4 joule
 b. 8,10 joule
 c. 10,8 joule
 d. 4,5 joule
 e. 0,6 joule

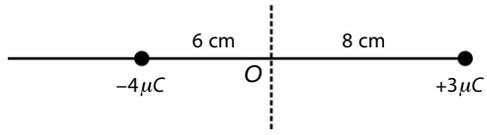
18. Menurut model Bohr tentang atom hidrogen, elektron ($q = -e$) mengelilingi proton ($q' = +e$) dengan jari-jari $5{,}3 \times 10^{-11}$. Jika $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C maka gaya Coulomb antara elektron dan proton pada atom hidrogen sebesar ... newton.
 a. $8{,}2 \times 10^{-8}$
 b. $2{,}8 \times 10^{-11}$
 c. $3{,}0 \times 10^{-8}$
 d. $1{,}4 \times 10^{-8}$
 e. $4{,}1 \times 10^{-8}$

19. Sebuah elektron mengelilingi proton pada jarak 1 Å. Jika massa elektron = $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg maka kecepatan elektron mengelilingi proton adalah ... m/s.
 a. $4{,}2 \times 10^{6}$
 b. $1{,}3 \times 10^{6}$
 c. $3{,}0 \times 10^{6}$
 d. $1{,}6 \times 10^{6}$
 e. $2{,}2 \times 10^{6}$

20. Dalam 1 coulomb terdapat ... buah elektron.
 a. $6{,}2 \times 10^{18}$
 b. $1{,}3 \times 10^{18}$
 c. $2{,}6 \times 10^{18}$
 d. $1{,}6 \times 10^{18}$
 e. $3{,}1 \times 10^{18}$

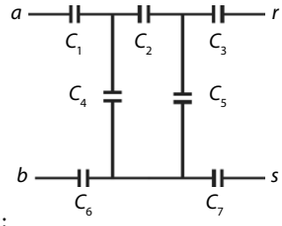
B. Jawablah pertanyaan berikut ini dengan tepat.

1. Perhatikan gambar berikut.



Tentukan:
 a. kuat medan di titik *O*;
 b. gaya yang dialami muatan $+3\mu C$.

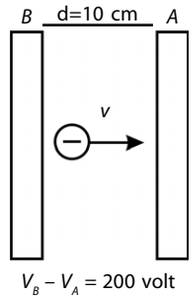
2. Perhatikan gambar berikut.



Tentukan:
 a. kapasitansi pengganti (C_{total}) antara titik a dan b jika setiap kapasitor memiliki kapasitas $3\mu F$);
 b. muatan pada setiap kapasitor jika titik a danb diberi beda potensial 12 Volt;
 c. energi pada setiap kapasitor jika *a* dan *s* diberi beda potensial 200 Vdan *b* dan *r* diberi beda potensial 400 V.

3. Sebuah kapasitor kapasitansinya $5\,\mu F$ jika dielektriknya vakum dan $30\,\mu F$ jika dielektriknya porselen. Hitunglah konstanta dielektrikum porselen.

4. Perhatikan gambar berikut.



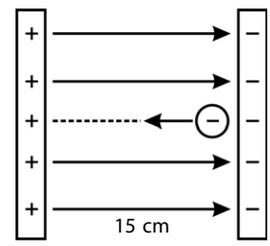
Jika muatan elektron = $1{,}6 \times 10^{-19}$ C dan massa elektron = $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg dilepas tanpa kecepatan awal tepat di titik *P*, tentukanlah:
 a. waktu yang dibutuhkan elektron sampai di tepi *A*;
 b. kecepatan saat tiba di tepi *A*.

5. Sebuah elektron ($q = e = 1{,}6 \times 10^{-19}$C; $m = 9{,}1 \times 10^{-31}$kg) ditembakkan dengan kecepatan 5×10^6 m/s dalam arah sejajar kuat medan listrik 4000 N/C. Berapa jarak yang ditempuh elektron sebelum berhenti?

6. Bola kecil bermuatan +2,0 nC; –2,0 nC; +3,0 nC, dan –6,0 nC diletakkan di titik-titik sudut sebuah persegi yang memiliki panjang diagonal 0,20 m.
 a. Hitung potensial listrik di pusat.
 b. Hitung besar medan listrik di pusat bola, kemudian gambarkan arah dari potensial di titik pusat.

7. Sebuah muatan uji + $4{,}00 \times 10^{-7}$C berjarak 5 mm dari muatan sumber –$2{,}00 \times 10^{-6}$C. Berapa usaha yang harus dilakukan pada muatan uji agar terpisah pada jarak 10 mm dari muatan tersebut?

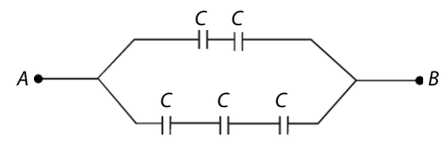
8. Dua keping logam yang sejajar dan jaraknya 15 cm satu dari yang lain diberi muatan listrik yang berlawanan hingga beda potensial 104 V.



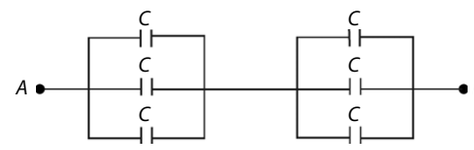
Berapa gaya yang dialami sebuah elektron yang diletakkan di antara keping?

9. Tentukan kapasitas pengganti antara A dan B pada susunan-susunan kapasitor berikut ini.

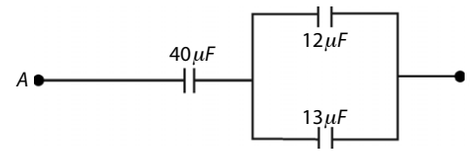
a.



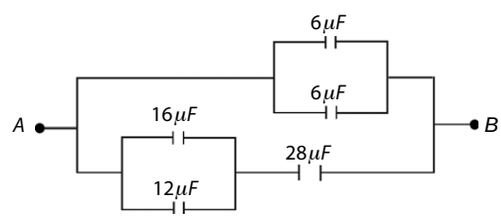
b.



c.



d.



10. Kapasitor $20\,\mu F$ dihubungkan dengan sumber tegangan 1.000 V, selanjutnya sumber tegangan diputus dan kapasitor kemudian dihubungkan paralel ke kapasitor $5\,\mu F$.
 a. Berapa muatan total kapasitor tersebut?
 b. Berapa beda potensial setiap kapasitor?
 c. Berapa energi yang hilang pada kapasitor $20\,\mu F$ ketika dihubungkan dengan kapasitor $5\,\mu F$?

Bab 5



Sumber: *Physics For Scientists and Engineers*, 2000

Jarum pada kompas menyimpang mengikuti arah medan magnetik yang ditimbulkan oleh kawat berarus.

Medan Magnetik

Hasil yang harus Anda capai:

menerapkan konsep kelistrikan dan kemagnetan dalam berbagai penyelesaian masalah dan produk teknologi.

Setelah mempelajari bab ini, Anda harus mampu:

menerapkan induksi magnetik dan gaya magnetik pada beberapa produk teknologi.

Sejarah kemagnetan telah dimulai sejak ratusan tahun yang lalu. Dahulu, di daerah Asia Kecil orang menemukan sebuah batu yang dapat saling menarik satu sama lain. Mereka menyebutnya sebagai *magnesia*. Kini, orang dapat membuat dan memanfaatkan benda seperti itu dan menyebutnya sebagai magnet.

Jika Anda perhatikan, magnet banyak dimanfaatkan pada *loudspeaker*, kompas, motor listrik, memori komputer, dan generator listrik. Dapatkah Anda menyebutkan benda-benda lain yang menggunakan magnet?

Jika Anda memiliki magnet batang, Anda dapat mengamati bagaimana benda-benda yang tergolong ferromagnetik, seperti besi dapat tertarik ketika ditempatkan di dalam medan magnetik batang tersebut.

Oersted menemukan bahwa medan magnetik tidak hanya ditimbulkan oleh sebuah magnet. **Oersted** mendemonstrasikan bagaimana jarum pada kompas menyimpang ketika didekatkan dengan sebuah kawat berarus listrik. Hal tersebut menandakan bahwa di sekitar kawat berarus listrik terdapat medan magnetik.

Apakah medan magnetik itu? Apakah benda ferromagnetik itu? Diterapkan dalam hal apa sajakah gejala kemagnetan itu? Pada bab ini, Anda akan mempelajari semua tentang kemagnetan dan penerapannya dalam teknologi.

A. Medan Magnetik
B. Gaya Magnetik
C. Aplikasi Gaya Magnetik
D. Sifat Magnet Bahan

Tes Kompetensi Awal

Sebelum mempelajari konsep Medan Magnetik, kerjakanlah soal-soal berikut dalam buku latihan.

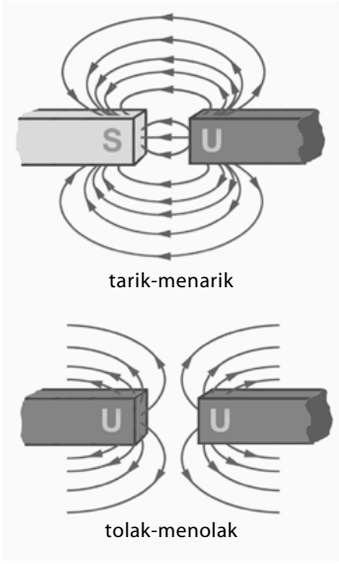
1. Menurut Anda, apakah kawat berarus dapat menghasilkan medan magnetik?
2. Apa yang akan terjadi jika kawat berarus disimpan di dalam medan magnetik? Coba jelaskan fenomena tersebut sesuai pengetahuan yang telah Anda miliki.
3. Coba Anda sebutkan komponen-komponen elektronik yang kerjanya menghasilkan medan magnetik.
4. Sebutkan dan jelaskan 3 jenis bahan magnetik. Berikan contohnya masing-masing satu buah.

A. Medan Magnetik

1. Medan Magnetik di Sekitar Magnet Permanen

Magnetisme diketahui orang sejak berabad-abad yang lalu. Zaman dulu, sejumlah orang mengetahui bahwa bijih besi yang berwarna metalik atau yang disebut magnetik memiliki sifat menarik partikel-partikel besi ke arahnya. Kata magnet berasal dari "*Magnesia*", yaitu suatu daerah di Asia Kecil tempat ditemukannya banyak endapan magnetik. Adapun kemagnetan adalah sifat-sifat dan gejala-gejala dari magnet.

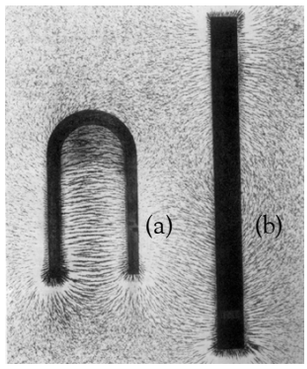
Di SMP, Anda telah mempelajari bahwa magnet memiliki dua kutub, yaitu kutub utara dan kutub selatan. Jika kutub-kutub sejenis didekatkan, kedua kutub tersebut akan tolak-menolak. Adapun jika kutub-kutub tidak sejenis didekatkan, kedua kutub tersebut akan tarik-menarik. Perhatikan **Gambar 5.1**.



Gambar 5.1
Pola garis gaya magnetik

Medan magnetik adalah daerah di sekitar magnet di mana magnet-magnet lain atau benda-benda magnetik yang diletakkan dalam daerah ini masih dipengaruhi magnet tersebut. Sumber medan magnetik dibedakan menjadi dua jenis, yaitu magnet permanen dan magnet induksi.

Di sekitar magnet permanen terdapat medan magnetik yang dapat digambarkan dengan garis-garis gaya magnetik. Garis-garis gaya magnetik selalu keluar dari kutub utara magnet dan masuk ke kutub selatan magnet. Di dalam magnet, garis-garis gaya magnetik memiliki arah dari selatan ke utara. Daerah yang memiliki medan magnetik kuat digambarkan dengan garis-garis gaya yang rapat, sedangkan daerah yang medan magnetiknya lemah digambarkan dengan garis-garis gaya magnetik yang renggang. Pola-pola garis gaya magnetik magnet U dan magnet batang ditunjukkan pada **Gambar 5.2**.

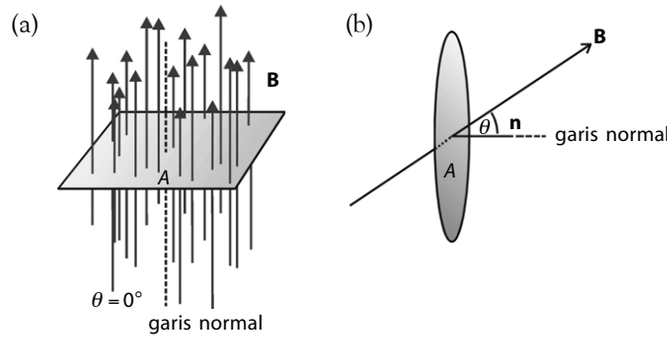


Sumber: *Physics*, 1995

Gambar 5.2
Pola garis gaya magnetik pada (a) magnet U dan (b) magnet batang.

Daerah atau tempat medan magnetik yang memiliki kuat medan magnetik paling besar disebut kutub magnet. Setiap magnet alam, apapun bentuknya, selalu memiliki dua kutub yaitu kutub utara dan kutub selatan.

Michael Faraday menggambarkan medan magnetik sebagai garis-garis gaya. Garis gaya yang semakin rapat menunjukkan medan magnetik yang semakin kuat. Kuat medan magnetik menunjukkan besarnya induksi magnetik. Perhatikan **Gambar 5.3**.



Gambar 5.3
(a) Garis gaya magnetik tegak lurus menembus bidang A (fluks magnetik);
(b) Medan magnetik B menembus bidang A dengan membentuk sudut θ terhadap garis normal.

Fluks magnetik (Φ) adalah banyaknya garis medan magnetik yang dilingkupi oleh suatu luas daerah tertentu (A) dalam arah tegak lurus. Secara matematis, dapat ditulis bahwa untuk B konstan dan A konstan (θ = konstan) persamaannya adalah:

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} A$$

$$\Phi = B A \cos \theta \qquad (5\text{–}1)$$

Jika sudut $\theta = 0$ atau B tegak lurus terhadap bidang A, **Persamaan (5–1)** menjadi:

$$\Phi = B A \qquad (5\text{–}2)$$

Keterangan:
n = vektor satuan searah garis normal
Φ = fluks magnetik (Wb)
A = luas bidang yang melingkupi oleh B (m^2)
B = medan magnetik (Wb/m^2)
θ = sudut antara **B** dan **n**

Contoh 5.1

Berapakah kuat medan magnetik yang dihasilkan oleh fluks magnetik 80 weber yang menembus bidang seluas 0,4 m^2 secara tegak lurus?

Jawab:
Diketahui: $\Phi = 80$ Wb; $A = 0{,}4\ m^2$.
Dengan menggunakan **Persamaan (5–2)** diperoleh:

$$B = \frac{\Phi}{A} = 200\ Wb/m^2$$

Jadi, kuat medan magnetik yang dihasilkan adalah 200 Wb/m^2.

2. Medan Magnetik di Sekitar Arus Listrik

Untuk memperjelas pemahaman mengenai medan magnetik, perhatikan **Gambar 5.4**. Ketika serbuk besi disebarkan di daerah medan magnetik, serbuk besi akan membentuk pola garis-garis gaya magnetik. Kerapatan garis-garis gaya yang biasa disebut *fluks magnet* tersebut menunjukkan besarnya kuat medan magnetik di tempat tersebut. Garis-garis gaya ini satu dan yang lain tidak pernah berpotongan dan selalu menjauhi kutub utara dan mendekati kutub selatan.

Pada sekitar 1820, **Hans Christian Oersted** (1770–1851), fisikawan asal Denmark, menemukan fakta bahwa *di sekitar kawat berarus listrik terdapat medan magnetik*. Fakta tersebut diperoleh setelah **Oersted** melakukan suatu percobaan sederhana. Agar lebih jelas memahami percobaan yang dilakukan **Oersted**, lakukanlah **Aktivitas Fisika** berikut.

Aktivitas Fisika 5.1

Medan Magnetik di Sekitar Kawat Berarus

Tujuan Percobaan
Mengamati medan magnetik yang disebabkan oleh kawat berarus listrik.

Alat-alat Percobaan
1. Sebuah baterai
2. Kabel
3. Sebuah saklar
4. Kawat penghantar
5. Kompas kecil

Informasi untuk Anda

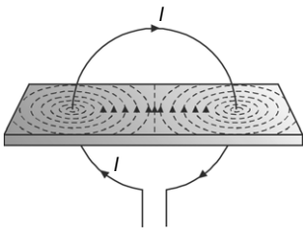


Sumber: *Conceptual Physics*, 1998

Baru-baru ini di dalam tengkorak burung merpati ditemukan sejenis sensor magnet yang tersusun dari magnet-magnet elementer. Tiap magnet tersebut terhubung dengan otak melalui saraf. Sensor tersebut dapat menentukan posisi arah melintang sepanjang magnet Bumi, selain itu juga dapat menentukan ketinggian posisinya dari permukaan Bumi.

Information for You

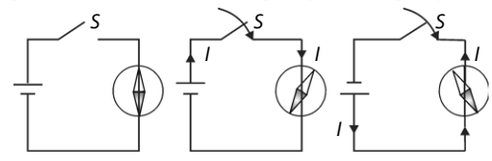
Pigeons have recently been found to have multiple-domain magnetite magnets within their skulls. That are connected with a large number of nerves to the pigeon's brain. Pigeons have a magnetic sense, and not only can they discern longitudinal directions along the earth's magnetic field, but they can also detect latitude by the dip of the earth's field.



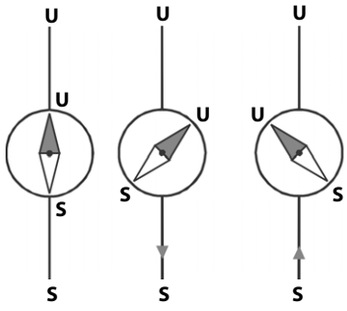
Gambar 5.4
Garis-garis gaya magnetik yang terbentuk oleh serbuk besi ketika ditempatkan di tempat yang dipengaruhi oleh kawat berarus listrik.

Langkah-langkah Percobaan

1. Susunlah peralatan sehingga terlihat seperti **Gambar (a)**. Dalam keadaan sakelar *S* terbuka, letakkan kawat penghantar di atas kompas dengan arah memanjang sejajar dengan jarum kompas.
2. Perhatikan arah penunjukan jarum kompas.
3. Kemudian, tutuplah sakelar *S* seperti pada **Gambar (b)**. Amati jarum kompas, apa yang terjadi?
4. Baliklah polaritas baterai seperti pada **Gambar (c)**. Lakukanlah pengamatan seperti langkah 2 dan 4. Amati yang terjadi dengan jarum kompas.



5. Apakah kesimpulan Anda dari kegiatan ini?



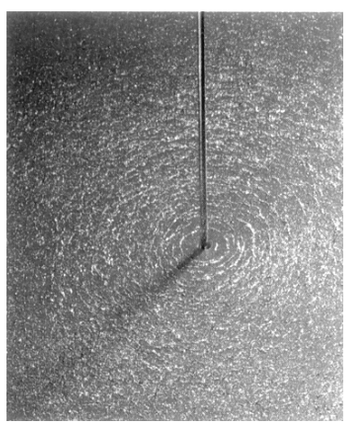
Gambar 5.5
(a) Penghantar tidak dilalui arus listrik; (b) Penghantar dialiri arus listrik dari utara; (c) Penghantar dialiri arus listrik dari arah selatan. Perhatikan arah simpangan jarumnya.

Oersted pertama kali mempublikasikan penemuannya tentang pengaruh kuat medan magnetik di sekitar kawat berarus. Pada awalnya, secara tidak sengaja ia meletakkan jarum kompas di atas kawat panjang yang berarus. Ternyata, jarum kompas tersebut mengalami penyimpangan. Peristiwa penyimpangan jarum kompas dapat Anda perhatikan melalui **Gambar 5.5**.

Jika tidak terdapat arus yang mengalir melalui sebuah penghantar, jarum kompas tetap pada posisi seimbang, yaitu utara-selatan seperti **Gambar 5.5(a)**. Ketika arus mengalir dari arah utara, jarum kompas akan menyimpang ke kanan seperti **Gambar 5.5(b),** dan ketika arus mengalir dari arah selatan, jarum kompas akan menyimpang ke kiri seperti **Gambar 5.5(c)**.

Dari percobaan yang dilakukannya, **Oersted** menyatakan bahwa di sekitar penghantar berarus terdapat medan magnetik yang arahnya bergantung kepada arah arus listrik yang mengalir melalui penghantar tersebut. Untuk menentukan arah arus listrik dan garis-garis medan magnetik, Anda dapat menggunakan aturan tangan kanan.

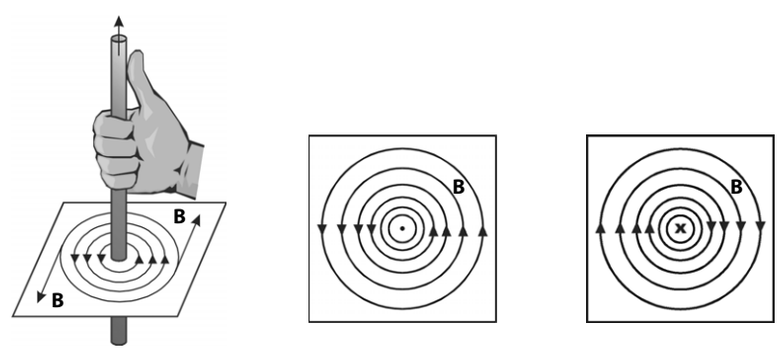
Jika arus listrik dialirkan pada kawat lurus yang menembus tegak lurus pada bidang yang telah ditaburi serbuk besi, serbuk-serbuk besi akan menunjukkan pola garis-garis medan magnetik yang berbentuk lingkaran sepusat, seperti ditunjukkan pada **Gambar 5.6**.



Sumber: *Conceptual Physics*, 1998

Gambar 5.6
Pola garis medan magnetik yang dibentuk oleh serbuk besi di sekitar kawat lurus berarus listrik.

Arah garis-garis gaya magnetik di sekitar penghantar berarus dapat ditentukan dengan kaidah tangan kanan, seperti **Gambar 5.7** berikut.



Gambar 5.7
(a) Kaidah tangan kanan; (b) Jika arus menuju pengamat, arah medan magnetik berputar ke kiri; (c) Jika arah arus menjauhi pengamat, arah medan magnetik berputar ke kanan.

Keterangan:
⊙ = arah arus menembus bidang gambar mendekati pengamat
⊗ = arah arus menembus bidang gambar menjauhi pengamat

Jika tangan kanan menggenggam penghantar lurus dengan ibu jari menunjukkan arah arus listrik, arah lipatan jari-jari yang lainnya menunjukkan arah putaran garis-garis gaya magnetik.

3. Hukum Biot-Savart

Setelah penemuan **Oersted**, dua orang fisikawan Prancis bernama **Jean Baptiste Biot** dan **Felix Savart** berhasil menentukan besarnya medan magnetik yang ditimbulkan oleh arus listrik stabil. **Biot** dan **Savart** melakukan pengamatan terhadap kontribusi induksi magnetik pada suatu titik yang ditimbulkan oleh sebuah penghantar berarus listrik.

Kuat medan magnetik dinyatakan dalam induksi magnetik. Perhatikan **Gambar 5.8**. Hukum Biot-Savart menyatakan besarnya induksi magnetik yang disebabkan oleh elemen arus listrik:

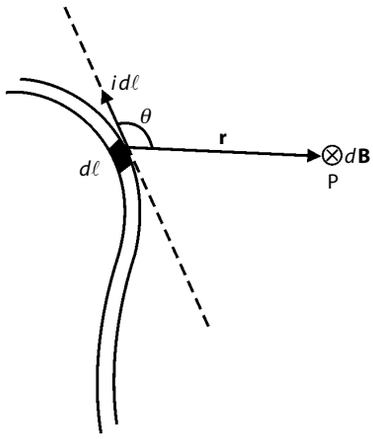
1. berbanding lurus dengan kuat arus listrik I;
2. berbanding lurus dengan panjang elemen penghantar $d\ell$;
3. berbanding terbalik dengan kuadrat jarak r antara sebuah titik tempat pengukuran induksi elektromagnetik dengan elemen penghantar $d\ell$;
4. sebanding dengan sinus sudut apit antara arah arus dan garis penghubung titik P dengan $d\ell$.

Secara matematis, persamaan Biot-Savart dapat ditulis sebagai berikut.

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\, d\ell \sin\theta}{r^2} \qquad (5\text{–}3)$$

Dimana θ adalah sudut antara arah dari $d\ell$ dan r, μ_0 adalah konstanta permeabilitas yang memiliki nilai sebagai berikut.

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \text{T m/A} \approx 1{,}26 \times 10^{-6}\ \text{T m/A} \qquad (5\text{–}4)$$



Gambar 5.8
Kawat $d\ell$ yang dialiri arus listrik.

4. Induksi Magnetik di Sekitar Kawat Lurus

Perhatikan **Gambar 5.9**. Seutas kawat lurus dengan panjang ℓ dialiri arus listrik sehingga timbul induksi magnetik disekitar kawat tersebut. Jika diambil elemen $d\ell$ pada kawat lurus tersebut dan sebuah titik P yang berjarak r dari $d\ell$, sudut yang dibentuk oleh elemen $d\ell$ dengan r adalah θ.

Berdasarkan persamaan Biot-Savart, besarnya induksi magnetik di titik P adalah

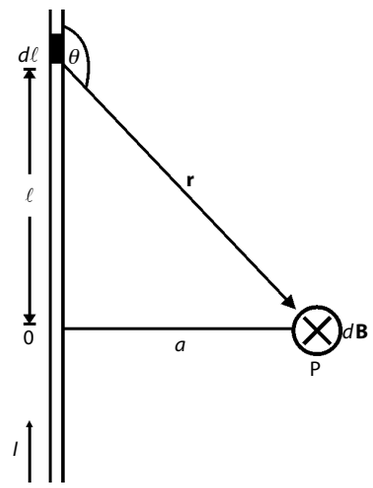
$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\ \frac{Id\ell\sin\theta}{r^2}$$

Jika panjang kawat ℓ adalah dari nol sampai jauh tak terhingga maka induksi magnetiknya menjadi:

$$B = \int_0^{\infty} dB = \int_0^{\infty} \frac{\mu_0}{4\pi}\ \frac{Id\ell\sin\theta}{r^2} \qquad (5\text{–}5)$$

Perhatikan kembali **Gambar 5.9**. **Persamaan (5–5)** merupakan induksi magnetik karena pengaruh kawat ℓ dari nol ke bawah diperhitungkan maka induksi magnetik total di P adalah

$$B = 2\int_0^{\infty} dB = \int_0^{\infty} \frac{\mu_0}{2\pi}\ \frac{Id\ell\sin\theta}{r^2} \qquad (5\text{–}6)$$



Gambar 5.9
Induksi magnetik akibat kawat lurus berarus di sebuah titik yang berjarak a dari kawat lurus tersebut.

Tugas Anda 5.1

Coba Anda cari informasi apakah di sekitar kawat lurus berarus timbul medan magnetik juga jika arus yang mengalir arus bolak-balik.

Variabel θ, ℓ, dan r dalam persamaan ini saling terikat sesuai bentuk segitiga yang dibentuknya.

$$r = \sqrt{\ell^2 + a^2}$$

dan

$$\sin\theta = \sin(\pi - \theta) = \frac{R}{\sqrt{\ell^2 + a^2}}$$

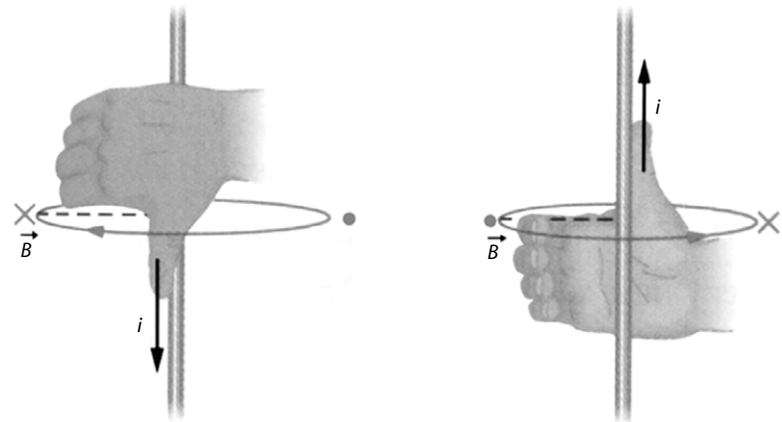
Dengan mensubstitusikan harga variabel-variabel ini pada **Persamaan (5–6)** dan mengintegralkannya didapat persamaan baru sebagai berikut.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi}\int_0^{\infty} \frac{R\, d\ell}{(\ell^2 + a^2)^{3/2}}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi}\left[\frac{\ell}{(\ell^2 + a^2)^{1/2}}\right]_0^{\infty}$$

$$\boxed{B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}} \qquad (5\text{–}7)$$

Untuk menentukan arah induksi magnetiknya dapat digunakan aturan tangan kanan. Perhatikan **Gambar 5.10**.



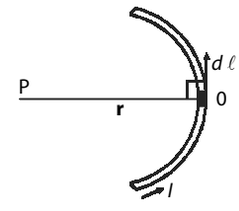
Gambar 5.10
Arah induksi magnetik di sekitar kawat lurus berarus. (a) Arah arus ke bawah; (b) Arah arus ke atas.

Contoh 5.2

Sebuah kawat lurus yang sangat panjang dialiri arus listrik 20 A. Tentukan besar induksi magnetik di: (a) titik P yang berjarak 5 cm dari kawat; (b) titik Q yang berjarak 10 cm dari kawat.

Jawab:

Dengan mengunakan **Persamaan (5–7)**, diperoleh



$$B_p = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\ \text{Wb/Am})(20\ \text{A})}{(2\pi)(5\times 10^{-2}\ \text{m})} = 8 \times 10^{-5}\ \text{T}$$

$$B_Q = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\ \text{Wb/Am})(20\ \text{A})}{(2\pi)(10\times 10^{-2}\ \text{m})} = 4 \times 10^{-5}\ \text{T}$$

Jadi, induksi magnetik di titik P adalah 8×10^{-5} T dan di titik Q adalah 4×10^{-5} T.

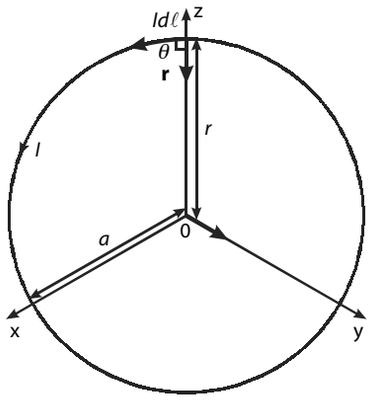


Tantangan untuk Anda

Jika pada kumparan yang dialiri arus listrik ditambahkan inti besi lunak, medan magnetik yang ditimbulkannya semakin besar. Mengapa demikian?

5. Induksi Magnetik di Sekitar Kawat Melingkar

Jika seutas kawat yang melingkar dialiri arus listrik, di sekitar kawat tersebut akan timbul induksi magnetik yang besarnya dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan Biot-Savart. Perhatikan **Gambar 5.11**. Cara yang mudah untuk menghitung besar induksi magnetik di sekitar kawat melingkar berarus, yaitu dengan menghitung besar induksi magnetik di pusat lingkaran tersebut (titik P).



Gambar 5.11
Induksi magnetik di pusat kawat melingkar berarus.

Induksi magnetik di pusat kawat melingkar dapat ditentukan seperti pada penentuan induksi magnetik di sekitar kawat lurus. Jika Anda perhatikan variabel θ pada **Gambar 5.11** adalah sebesar 90° karena **r** tegak lurus dengan arah elemen $d\ell$. Harga **r** sama dengan a karena keduanya berhimpitan sehingga jika variabel-variabel tersebut dimasukkan ke dalam persamaan Biot-Savart akan didapat medan magnetik di pusat lingkaran sebagai berikut.

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\,\frac{I\,d\ell \sin 90^\circ}{a^2} = \frac{\mu_0}{4\pi}\,\frac{I\,d\ell}{a^2}$$

Perlu Anda perhatikan bahwa panjang kawat sama dengan keliling kawat sehingga integral memiliki batas dari nol sampai $2\pi a$ sehingga persamaan menjadi

$$B_0 = \frac{\mu_0}{4\pi}\int_0^{2\pi a}\frac{I\,d\ell}{a^2}$$

$$B_p = \frac{\mu_0 I}{4\pi a^2}(2\pi a - 0)$$

$$\boxed{B_p = \frac{\mu_0 I}{2a}} \qquad (5\text{–}8)$$

Persamaan (5–8) berlaku untuk satu kawat melingkar. Jika terdapat N lilitan kawat melingkar maka induksi medan magnetik di pusat lingkaran kawat menjadi

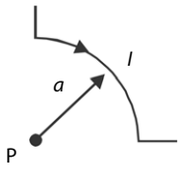
$$\boxed{B_p = \frac{\mu_0 IN}{2a}} \qquad (5\text{–}9)$$

Arah medan magnetik dapat ditentukan dengan aturan tangan kanan seperti pada **Gambar 5.10**.

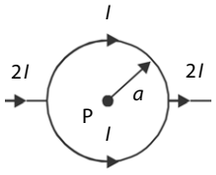
Contoh 5.3

Perhatikan gambar berikut. Jika induksi magnetik di pusat lingkaran berarus listrik I yang berjari-jari a adalah B, tentukan induksi magnetik di titik P.

a.



b.



Jawab:

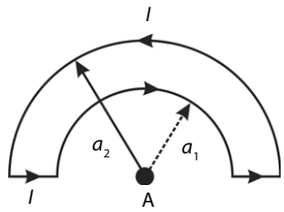
a. Oleh karena bentuk kawat hanya berupa $\frac{1}{4}$ lingkaran, besar induksi magnetik di P adalah $Bp = \frac{1}{4}B$ dengan arah ⊗ (masuk bidang).

b. Resultan kuat medan magnetik di titik P adalah $Bp = \frac{1}{2}B - \frac{1}{2}B = 0$



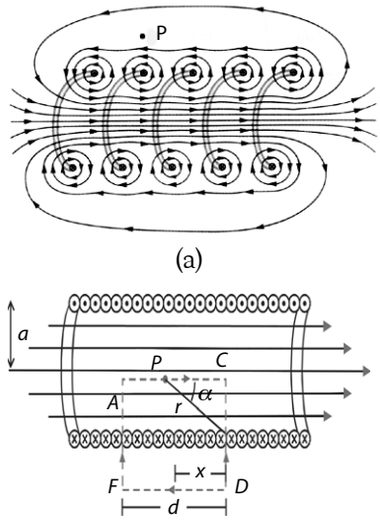
Tantangan untuk Anda

Perhatikan gambar berikut.



Penghantar berbentuk dua setengah lingkaran konsentris, memiliki jari-jari a_1 = 2 cm dan a_2 = 4 cm. Penghantar dialiri oleh arus listrik I = 2 A.Tentukanlah besar induksi magnetik total yang timbul di titik pusat A.

6. Induksi Magnetik di Pusat dan Ujung Solenoida



Gambar 5.12
(a) Solenoida yang dialiri arus listrik; (b) Penampang irisan membujur solenoida.

Solenoida adalah suatu lilitan kawat penghantar yang panjang atau kumparan rapat yang menyerupai lilitan pegas, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 5.12(a)**. Jika kumparan penghantar diiris secara membujur (melintang), akan didapat irisan penampang seperti pada **Gambar 5.12(b)**.

Kumparan penghantar yang berarus listrik akan menghasilkan garis medan magnetik dengan pola sama dengan yang dihasilkan oleh magnet batang.

Jika panjang solenoida (ℓ) dan terdiri atas N buah lilitan, jumlah lilitan untuk setiap satuan panjang menjadi $n = \frac{N}{\ell}$ dan jari-jari kumparannya a. Induksi magnetik di titik P yang terletak pada sumbu solenoida dan disebabkan oleh elemen solenoida sepanjang dx adalah:

$$dB = \frac{\mu_0 nIa}{2r^2}\sin\alpha\, d\alpha \qquad (5\text{–}10)$$

α adalah sudut antara r dan x sehingga

$$\frac{a}{r} = \sin\alpha \Rightarrow r = \frac{a}{\sin\alpha} = a\,\text{cosec}\,\alpha$$

$$\frac{x}{a} = \text{cotan}\,\alpha \Rightarrow x = a\,\text{cotan}\,\alpha \Rightarrow dx = -a\,\text{cosec}^2\,\alpha\, d\alpha$$

Besarnya induksi magnetik di P oleh seluruh panjang kawat solenoida dengan mensubstitusikan harga r dan dx ke dalam **Persamaan (5–10)** adalah

$$B = \int dB = \int_{\alpha 1}^{\alpha 2} -\frac{\mu_0 nI}{2}\sin\alpha\, d\alpha$$

$$B = \frac{\mu_0 nI}{2}(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1) \qquad (5\text{–}11)$$

Jika solenoida tersebut sangat panjang sehingga $\alpha_1 = 0°$ dan $\alpha_2 = 180°$, besar induksi magnetik di pusat solenoida adalah

$$B = \mu_0 In \;\text{ atau }\; B = \frac{\mu_0 IN}{\ell} \qquad (5\text{–}12)$$

Besar induksi magnetik di ujung solenoida dengan $\alpha_1 = 0°$ dan $\alpha_2 = 90°$ adalah

$$B = \frac{\mu_0 In}{2} \;\text{ atau }\; B = \frac{\mu_0 IN}{2\ell} \qquad (5\text{–}13)$$

Tokoh

Hans Oersted
(1777–1851)



Hans Oersted adalah seorang ahli Fisika berkebangsaan Denmark. Pada tahun 1819 ia menemukan hubungan mendasar antara kemagnetan dan kelistrikan. Percobaannya menunjukkan terjadinya pembelokan pada jarum kompas ketika didekatkan dengan kawat berarus. Fenomena ini dikenal dengan elektromagnetisme.

Sumber: *www.allautobiographies.com*

Contoh 5.4

Sebuah solenoida yang panjangnya $\ell = 2$ m dan jari-jari $r = 2$ m memiliki 800 lilitan, solenoida tersebut dialiri arus sebesar 0,5 A.

a. Tentukan induksi magnetik di ujung solenoida.
b. Jika solenoida direnggangkan sehingga panjangnya dua kali semula, berapakah besarnya induksi magnetik di ujung solenoida tersebut?

Jawab:

a. Induksi magnetik di ujung solenoida ditentukan dengan menggunakan **Persamaan (5–13)**, yaitu

$$B_p = \frac{\mu_0 In}{2} \Rightarrow \frac{\left(4\pi\times10^{-7}\ \text{Wb/Am}\right)(0{,}5\ \text{A})\left(\frac{800}{2\text{m}}\right)}{2} = 4\pi\times10^{-5}\ \text{T}$$

b. Jika panjangnya dijadikan dua kali semula, $\ell = 4$ m sehingga induksi magnetik di ujung solenoida menjadi

$$B_p = \frac{\mu_0 In}{2} \Rightarrow \frac{\left(4\pi \times 10^{-7}\ \text{Wb/Am}\right)(0{,}5\ \text{A})\left(\frac{800}{4\ \text{m}}\right)}{2} = 2\pi \times 10^{-5}\ \text{T}$$

6. Induksi Magnetik di Sumbu Toroida

Toroida adalah kumparan yang dilengkungkan sehingga sumbunya membentuk sebuah lingkaran. Jika toroida dialiri arus listrik, akan timbul garis-garis medan magnetik berbentuk lingkaran di dalam toroida tersebut.

Besarnya induksi magnetik di titik P yang berada di pusat sumbu toroida adalah

$$B = \mu_0 In \qquad (5\text{–}14)$$

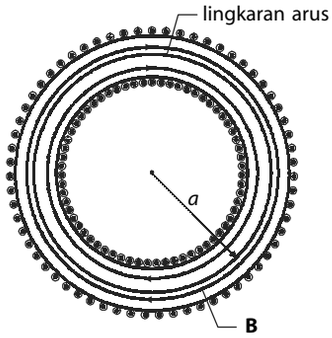
Nilai n adalah jumlah lilitan (N) persatuan keliling lingkaran ($2\pi a$) sehingga **Persamaan (5–14)** dapat ditulis sebagai berikut.

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi a} \qquad (5\text{–}15)$$

Keterangan:
a = jari-jari toroida (m)
N = jumlah lilitan

Kata Kunci

- medan magnetik
- garis gaya magnetik
- fluks magnet
- kaidah tangan kanan
- hukum Biot-Savart
- solenoida
- toroida
- induksi magnetik



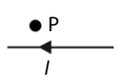
Gambar 5.13
Toroida yang dialiri arus listrik.

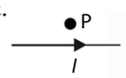
Tes Kompetensi Subbab A

Kerjakanlah dalam buku latihan.

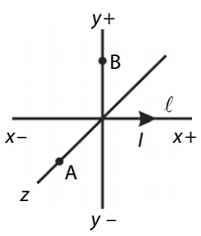
1. Tentukan arah medan magnetik di titik P pada gambar berikut.

a. 

b. 

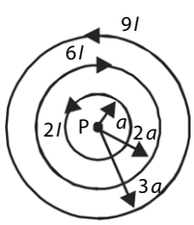
c. 

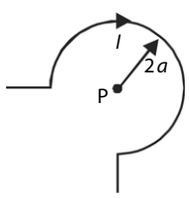
2. Sebuah kawat lurus berarus listrik diletakkan memanjang pada arah utara-selatan. Jika arus mengalir pada kawat dari utara ke selatan, tentukan arah medan magnetik di titik P yang berjarak r di atas kawat tersebut.
3. Pada gambar berikut.



Penghantar ℓ yang berarus listrik berhimpitan dan searah dengan sumbu-x positif. Tentukan arah medan magnetik di titik A dan B.

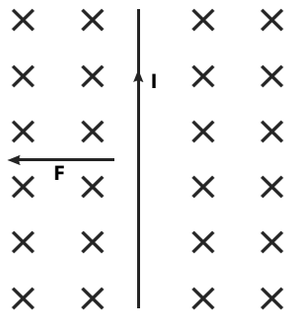
4. Jika induksi magnetik di pusat kawat lingkaran yang berarus I dan berjari-jari a adalah B, tentukan induksi magnetik di titik P pada gambar berikut.

a. 

b. 

5. Sebuah kumparan kawat berdiameter 40 cm terdiri atas 200 lilitan. Tentukan besar arus yang mengalir melalui kumparan itu jika besar induksi magnetik di pusat kumparan 5×10^{-3} Wb/m^2.

B. Gaya Magnetik



Gambar 5.14
Seutas kawat berarus **I** berada di ruang yang dipengaruhi medan magnetik **B** sehingga timbul gaya magnetik (**F**) pada kawat tersebut.

Di Kelas XI, Anda telah mengetahui bahwa jika penghantar yang dialiri arus listrik dan ditempatkan di daerah medan magnetik, penghantar tersebut akan mengalami gaya. Gaya yang dialami penghantar tersebut dinamakan *gaya magnetik* atau *gaya Lorentz*.

Perhatikan **Gambar 5.14**. Seutas kawat dengan panjang ℓ yang dialiri arus listrik I ditempatkan di dalam medan magnetik B yang arahnya tegak lurus menembus bidang kertas. Kawat tersebut akan melengkung karena pengaruh gaya magnetik. Besarnya gaya magnetik yang dialami oleh kawat berarus listrik di dalam medan magnetik berbanding lurus dengan kuat arus, panjang kawat penghantar, kuat medan magnetik, dan sinus sudut antara arah arus dan arah induksi magnetik. Secara matematis, besar gaya magnetik dapat dituliskan sebagai berikut.

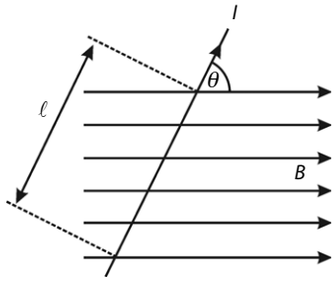
$$F = BI\ell \sin\theta \qquad (5\text{–}16)$$

Keterangan:
F = gaya magnetik (N)
I = kuat arus listrik (A)
B = induksi magnetik (T)
θ = sudut yang dibentuk oleh I dengan B
ℓ = panjang kawat penghantar

Dalam bentuk vektor, **Persamaan (5–16)** dapat ditulis sebagai berikut.

$$\mathbf{F} = (\mathbf{I} \times \mathbf{B})\,\ell \qquad (5\text{–}17)$$

1. Menentukan Arah Gaya Magnetik



Gambar 5.15
Penghantar panjang ℓ berarus listrik **I** di dalam medan magnetik homogen **B**.

Anda telah mengetahui bahwa jika seutas kawat yang memiliki panjang ℓ dialiri arus listrik **I** dan ditempatkan di dalam medan magnetik **B**, akan timbul gaya magnetik. Besarnya gaya magnetik (**F**) pada kawat berarus dapat ditentukan dengan menggunakan **Persamaan (5–17)**. Akan tetapi, bagaimanakah cara menentukan arah dari gaya magnetik. Untuk mengetahuinya, lakukanlah **Aktivitas Fisika** berikut ini.



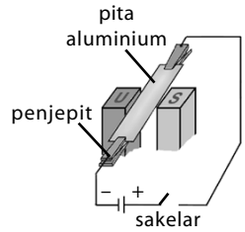
Aktivitas Fisika 5.2

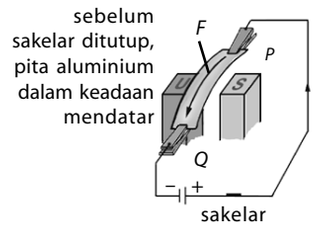
Gaya Magnetik

Tujuan Percobaan
Mengamati gaya magnetik

Alat-Alat Percobaan
1. Aluminium foil
2. Sebuah magnet U
3. Sebuah baterai
4. Sebuah sakelar
5. Dua buah penjepit

Langkah-Langkah Percobaan
1. Susunlah peralatan tersebut, seperti pada gambar berikut.





2. Tutuplah sakelar agar arus listrik mengalir melalui pita aluminium.
3. Apakah yang terjadi dengan pita aluminium tersebut?
4. Ubahlah polaritas dari baterai, kemudian amati yang terjadi pada pita aluminium.
5. Balikkan posisi kutub magnet U, kemudian amati yang terjadi pada pita aluminium.
6. Apakah kesimpulan Anda dari kegiatan ini?

Perhatikan **Gambar 5.16**. Jika kawat penghantar yang dialiri arus listrik I diletakkan di dalam daerah medan magnetik B, kawat tersebut akan mengalami gaya magnetik F yang arahnya seperti ditunjukkan pada gambar tersebut sehingga kawat akan melengkung ke atas.

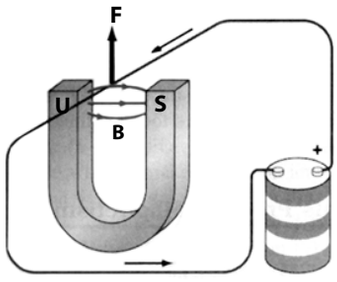
Akan tetapi, jika polaritas baterai dibalik, kawat akan melengkung ke bawah akibat dari gaya magnetik yang arahnya ke bawah. Begitu pula halnya jika arah induksi magnetik diubah dengan cara mengubah posisi magnet U, arah dari gaya magnetik bergantung pada arah arus listrik (I) dan arah medan magnetik (B).

Dalam menentukan arah gaya magnetik yang dialami kawat berarus listrik di dalam medan magnetik dapat digunakan kaidah tangan kanan berikut ini.

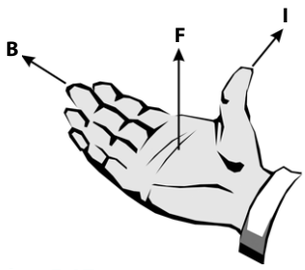
Jika telapak tangan kanan dibuka sedemikian sehingga keempat jari yang dirapatkan menunjuk arah medan magnetik B dan ibu jari menunjuk ke arah arus listrik, arah dorong telapak tangan menunjukkan arah gaya magnetik F yang dialami oleh kawat berarus (perhatikan **Gambar 5.17**).

Jadi, arah gaya magnetik dengan kaidah tangan kanan menunjukkan:

a. ibu jari sebagai arah arus (I);
b. arah gaya magnetik keluar dari telapak tangan (F);
c. sudut θ adalah sudut yang dibentuk oleh ibu jari (I) dengan jari yang lainnya (B).



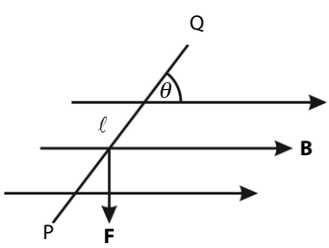
Gambar 5.16
Gaya magnetik yang dialami kawat penghantar berarus listrik.



Gambar 5.17
Arah gaya magnetik sesuai dengan kaidah tangan kanan.

Contoh 5.5

Penghantar PQ yang panjangnya $\ell = 3$ m dan induksi magnetik $B = 2$T terletak pada bidang datar, keduanya membentuk sudut $\theta = 60°$ satu sama lain. Jika gaya magnetik F yang bekerja pada penghantar besarnya 3 N dengan arah seperti pada gambar, tentukan besar dan arah arus listrik yang mengalir pada penghantar itu.



Jawab:

Dengan menggunakan kaidah tangan kanan, diperoleh arah arus dari P ke Q. Sesuai dengan **Persamaan (5–16)**, diperoleh

$F = BI\ell \sin\theta \Rightarrow 3\text{ N} = (2\text{ T})(I)(3\text{ m})\sin 60°$

$$I = \frac{3\text{ N}}{(2\text{ T})(3\text{ m})\frac{1}{2}\sqrt{3}} \Rightarrow I = \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{1}{3}\sqrt{3}\text{ A}$$

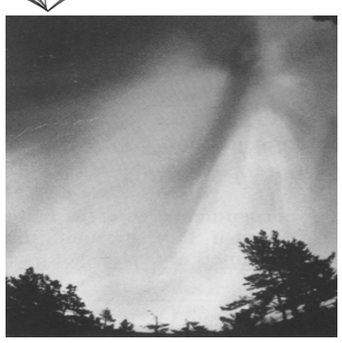
Jadi, kuat listrik adalah $\frac{1}{3}\sqrt{3}$ A mengalir dari P ke Q.

2. Gaya Magnetik pada Muatan yang Bergerak

Jika muatan listrik q bergerak dengan kecepatan v dalam medan magnetik homogen B, akan timbul gaya magnetik pada muatan tersebut. Anda tentu mengetahui bahwa hubungan antara muatan (q) dan kuat



Informasi untuk Anda

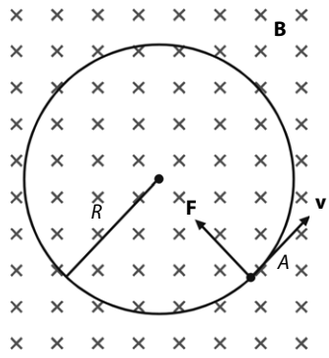


Sumber: *Physics for Scientist and Engineers*

Ion bermuatan dari Matahari mendekati Bumi dan masuk ke atmosfer menuju daerah kutub pada umumnya dikatakan adanya pengaruh medan magnetik Bumi. Kadang-kadang kejadian ini menimbulkan fenomena yang disebut *aurora borealis* atau *cahaya utara* di daerah lintang utara.

Information for You

Charged ions approach the Earth from the Sun and enter the atmosphere mainly near the poles, sometimes causing a phenomenon called the aurora borealis *or* northern lights *in northern latitudes.*



Gambar 5.18
Gaya yang dialami muatan bergerak dalam medan magnetik.

arus (I) adalah $I = \frac{q}{t}$ sehingga **Persamaan (5–16)** dapat dinyatakan menjadi

$$F = B\frac{q}{t}\ell \sin\theta$$

Lintasan yang ditempuh muatan dalam selang waktu t sama dengan besar kecepatan, yaitu $v = \frac{\ell}{t}$ sehingga besar gaya magnetik pada muatan listrik yang bergerak dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\boxed{F = Bqv \sin\theta} \qquad (5\text{–}18)$$

Keterangan:
v = besar kecepatan muatan (m/s)
θ = sudut apit antara kecepatan v dan medan magnetik B.

Partikel bermuatan yang bergerak tegak lurus terhadap medan magnetik B akan mengalami gaya magnetik yang arahnya selalu tegak lurus terhadap arah kecepatan. Dengan demikian, gaya magnetik berfungsi sebagai gaya sentripetal sehingga gerak partikel merupakan gerak melingkar beraturan seperti tampak pada **Gambar 5.18** (Ingat fungsi gaya sentripetal pada gerak melingkar).

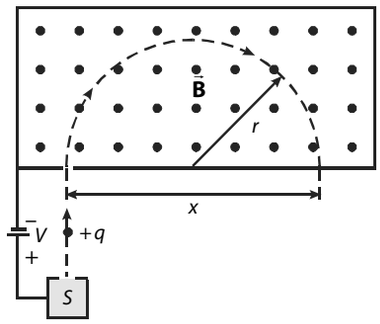
Berdasarkan **Persamaan (5–18)**, untuk $\theta = 90°$, gaya magnetik dinyatakan dengan persamaan

$$\boxed{F = qvB} \qquad (5\text{–}19)$$

Partikel bermuatan bergerak melingkar karena mendapatkan gaya sentripetal, yaitu gaya magnetik. Menurut Hukum II Newton pada gerak melingkar beraturan, besarnya gaya dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\sum F = ma_s \Rightarrow Bqv = m\frac{v^2}{r}$$

$$\boxed{r = \frac{mv}{Bq}} \qquad (5\text{–}20)$$



Gambar 5.19
Pengukuran massa ion menggunakan spektroskop massa.

Keterangan:
r = jari-jari lintasan (m)
B = induksi magnetik (T)
m = massa partikel (kg)
q = muatan partikel (C)
v = kecepatan linear partikel (m/s)

Bagaimanakah cara mengukur massa sebuah partikel bermuatan (ion)? Untuk mengukur massa sebuah partikel bermuatan (ion) dapat digunakan spektroskop massa. Perhatikan **Gambar 5.19** yang mengilustrasikan sebuah spektroskop massa.

Partikel bermuatan (ion) $+q$ dihasilkan oleh penghasil ion setelah timbul medan listrik akibat beda potensial V. Ion tersebut meninggalkan tempat S, kemudian masuk ke dalam ruang yang di dalamnya terdapat medan magnetik homogen B melalui sebuah celah. Medan magnetik B menyebabkan ion bergerak setengah lingkaran dengan jari-jari r di dalam ruang tersebut.

Besarnya energi kinetik ion pada saat muncul dan mulai bergerak sama dengan nol. Akan tetapi, setelah ion bergerak dan sampai di posisi akhirnya, ion tersebut memiliki energi kinetik sebesar $\frac{1}{2}mv^2$. Ion bergerak

karena adanya perubahan potensial di dalam spektroskop sebesar $-V$. Oleh karena muatan yang bergerak adalah muatan positif (ion+), perubahan energi potensial yang terjadi akibat gerakan ion tersebut adalah

$$\Delta E_p = -qV$$

Berdasarkan Hukum Kekekalan Energi Mekanik

$$\Delta E_k + \Delta E_p = 0$$

$$\frac{1}{2}mv^2 - qV = 0$$

$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}} \qquad (5\text{–}21)$$

Persamaan (5–21) adalah persamaan yang menyatakan besarnya kecepatan ion di dalam spektroskop. Dengan mensubstitusikan **Persamaan (5–21)** ke **Persamaan (5–20)** maka akan diperoleh

$$r = \frac{mv}{qB}$$

$$r = \frac{m}{qB}\sqrt{\frac{2qV}{m}}$$

$$r = \frac{1}{B}\sqrt{\frac{2mV}{q}} \qquad (5\text{–}22)$$

Perhatikan kembali **Gambar 5.18**, $x = 2r$, maka

$$x = 2r = \frac{2}{B}\sqrt{\frac{2mV}{q}}$$

Dengan demikian, besarnya massa ion (partikel bermuatan) dapat dinyatakan dengan persamaan

$$m = \frac{B^2qx^2}{8V} \text{ atau } m = \frac{B^2qr^2}{2V} \qquad (5\text{–}23)$$

Contoh 5.6

Sebuah partikel bermuatan 5 μC berada dalam medan magnetik homogen $B = 10^{-2}$ T. Jika kecepatan partikel tegak lurus medan magnetiknya dan lintasan partikel berupa lingkaran dengan jari-jari 40 cm, tentukan besarnya momentum partikel.

Jawab:

Diketahui: $q = 5\,\mu\text{C} = 5 \times 10^{-6}$ C;
$B = 10^{-2}$ T;
$R = 40$ cm $= 0{,}4$ m.

Dengan menggunakan **Persamaan (5–20)**, akan diperoleh

$$R = \frac{mv}{Bq} \Rightarrow mv = qBR$$

Dengan demikian, momentum partikel adalah:

$P = mv = qBR$
$P = (5 \times 10^{-6}\text{ C})(10^{-2}\text{ T})(0{,}4\text{ m})$
$= 2 \times 10^{-8}$ Ns

Jadi, momentum partikel tersebut adalah 2×10^{-8} Ns.



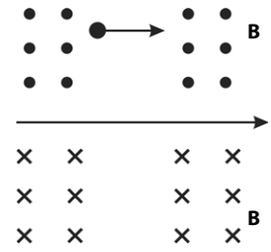
Tantangan untuk Anda

Suatu partikel bermuatan 0,04 C bergerak sejajar dengan kawat berarus listrik 10 A. Jika jarak antara partikel dan kawat 5 cm, hitunglah berapa gaya yang dialami partikel tersebut?

Contoh 5.7

Sebuah partikel bergerak di sekitar kawat berarus listrik seperti gambar berikut. Tentukan arah gaya magnetik yang dialami partikel, jika partikel tersebut:

a. proton;
b. elektron.



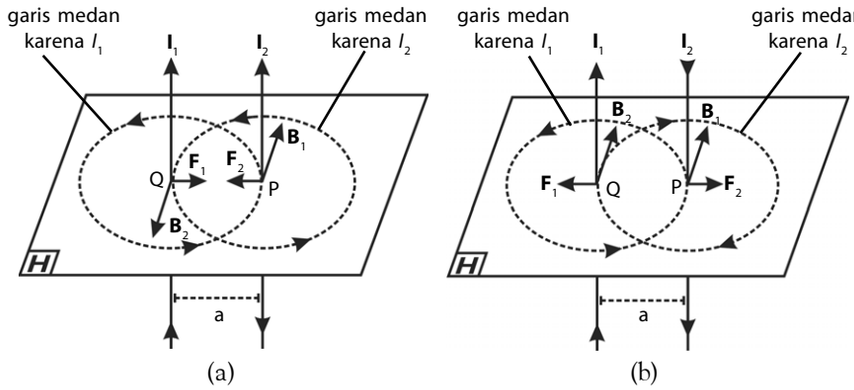
Jawab:

Arah medan magnetik B di atas kawat adalah keluar bidang kertas, sedangkan di bawah kawat masuk bidang kertas. Jadi, arah gaya F diperoleh dari kaidah tangan kanan.

a. Untuk partikel bermuatan positif, yaitu proton, arah gaya F mendekati kawat.
b. Untuk partikel bermuatan negatif, yaitu elektron, arah gaya F menjauhi kawat.

3. Gaya Magnetik antara Dua Kawat Sejajar

Pada dua kawat penghantar sejajar yang terpisah sejauh a dialiri arus listrik I_1 dan I_2. Pada **Gambar 5.20(a)**. I_1 searah dengan I_2, dan pada **Gambar 5.20(b)**, I_1 berlawanan arah dengan I_2. Ternyata, pada **Gambar 5.20(a)**, kedua kawat saling mendekat atau tarik-menarik, sedangkan pada **Gambar 5.20(b)**, kedua kawat saling menjauh atau tolak-menolak. Ini menunjukkan bahwa antara kedua kawat timbul gaya magnetik.



Gambar 5.20
Dua buah penghantar lurus sejajar dialiri oleh arus listrik. (a) I_1 searah dengan I_2. (b) I_1 berlawanan arah dengan I_2.

Besarnya gaya timbal-balik antara kawat satu dan kawat yang lain dapat diturunkan sebagai berikut. Pada **Gambar 5.20(a)**, arus listrik I_1 menimbulkan induksi magnetik B_1 di titik P, maka besar B_1 adalah

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi a}$$

Penghantar berarus I_2 akan dipengaruhi oleh induksi magnetik B_1 sehingga mengalami gaya magnetik F_2 sesuai dengan persamaan

$$F_2 = B_1 I_2 \ell_2 \sin\alpha$$

$$F_2 = \left(\frac{\mu_0 I_1}{2\pi a}\right) I_2 \ell_2 \sin 90° \Rightarrow \frac{F_2}{\ell_2} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a}$$

Selanjutnya, penghantar berarus I_2 menimbulkan induksi magnetik B_2 di titik Q. Besarnya $B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi a}$.

Penghantar arus I_1 akan dipengaruhi oleh induksi magnetik B_2 sehingga mengalami gaya magnetik sesuai dengan persamaan

$$F_1 = B_2 I_1 \ell_1 \sin\alpha \Rightarrow F_1 = \left(\frac{\mu_0 I_2}{2\pi a}\right) I_1 \ell_1 \sin 90° \Rightarrow \frac{F_1}{\ell_1} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a}$$

Dari persamaan-persamaan tersebut, diperoleh gaya per satuan panjang untuk kedua penghantar adalah sama. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa *pada dua penghantar lurus sejajar yang dialiri arus listrik akan terjadi gaya tarik-menarik jika kedua arusnya memiliki arah yang sama, sedangkan gaya tolak-menolak akan terjadi jika kedua arus listriknya berlawanan arah.*

Jadi, $\frac{F_1}{\ell_1} = \frac{F_2}{\ell_2}$ disebut sebagai $\frac{F}{\ell}$, yaitu

$$\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \qquad (5\text{–}24)$$

Jika $I_1 = I_2$, **Persamaan (5–24)** dapat ditulis menjadi

$$\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi a} \qquad (5\text{–}25)$$

Kata Kunci

- gaya magnetik
- kaidah tangan kanan

Contoh 5.8

Dua kawat sejajar yang satu sama lain berjarak 20 cm dialiri arus listrik sama besar. Jika antara keduanya timbul gaya timbal-balik per satuan panjang sebesar $2{,}5 \times 10^{-3}$ N/m, hitunglah kuat arus pada masing-masing kawat.

Jawab:

Diketahui:

$a = 20$ cm $= 0{,}2$ m;

$\frac{F}{\ell} = 2{,}5 \times 10^{-3}$ N/m.

Gaya per satuan panjang yang dialami kedua kawat memenuhi persamaan

$$\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi a} \Rightarrow 2{,}5 \times 10^{-3}\ \text{N/m} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\ \text{Wb/Am})(I^2)}{2\pi(0{,}2\ \text{m})}$$

$I^2 = 2.500\ \text{A}^2 \Rightarrow I = 50$ A

Jadi, kuat arus pada masing-masing kawat adalah 50 A.

Tes Kompetensi Subbab B

Kerjakanlah dalam buku latihan.

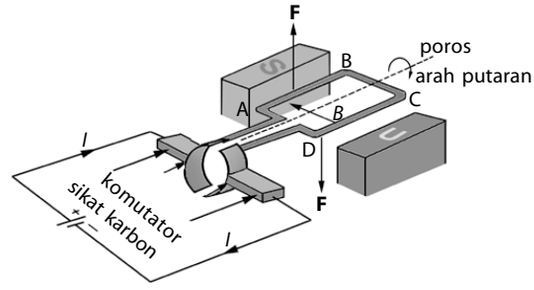
1. Sebuah kawat yang panjangnya 50 cm berada tegak lurus di dalam medan magnetik. Jika rapat fluks magnetiknya 0,2 tesla dan arus yang mengalir melalui kawat 20 A, tentukan gaya magnetik yang dialami kawat.
2. Sepotong kawat panjangnya 2 m dan bermassa 50 g. Kawat direntangkan horizontal memotong medan magnetik 0,025 T yang juga horizontal dan membentuk sudut 30° terhadap kawat. Berapakah kuat arus yang mengalir dalam kawat untuk mengimbangi gaya gravitasi ($g = 10\ \text{m/s}^2$)?
3. Sebuah elektron ($q = -1{,}6 \times 10^{-19}$ C) bergerak di dalam suatu medan magnetik serba sama dengan induksi magnetik 0,2 tesla. Arah gerak elektron membentuk sudut 60° terhadap arah garis medan magnetik. Jika elektron mengalami gaya magnetik sebesar $64\sqrt{3} \times 10^{-14}$ N, berapakah besar kecepatannya?
4. Sebuah proton ($q = -1{,}6 \times 10^{-19}$ C) bergerak dengan kecepatan 3×10^{-5} m/s melalui suatu medan magnetik yang serba sama dengan induksi magnetik (B) = 0,2 T dalam arah sumbu-z positif. Jika proton bergerak pada bidang xy dan membuat sudut 30° terhadap sudut-z positif, tentukan besar dan arah gaya magnetik yang bekerja pada proton.
5. Sebuah proton ditembakkan sepanjang sumbu x positif dengan kecepatan $6{,}0 \times 10^2$ m/s. Gerak proton melintasi medan magnetik 0,035 T. Tentukan besar arah gaya yang bekerja pada proton itu jika garis-garis gaya magnetik berarah ke (a) sumbu-x negatif, (b) sumbu-z positif, (c) sumbu-y negatif.

C. Aplikasi Gaya Magnetik

Penggunaan gaya magnetik dalam kehidupan sehari-hari antara lain sebagai berikut.

1. Motor Listrik

Pernahkah Anda membongkar dinamo pada kipas angin atau dinamo pada radio *tape*? Dinamo yang ada pada alat tersebut sebenarnya adalah motor yang digerakkan oleh tenaga listrik. Motor listrik adalah alat yang mengubah energi listrik menjadi energi kinetik (gerak). Skema motor listrik sederhana ditunjukkan pada **Gambar 5.21**.



Gambar 5.21
Skema motor listrik

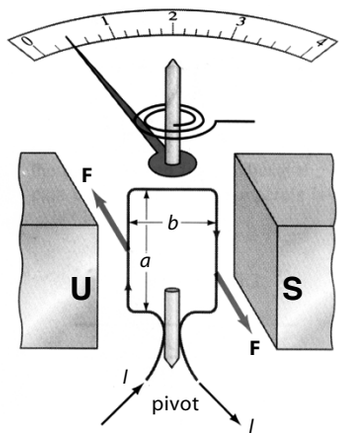
Tugas Anda 5.2

Anda mengenal kipas angin, mesin cuci, dan motor penggerak mesin jahit. Alat-alat tersebut dihubungkan dengan listrik arus *AC*. Carilah cara kerjanya. Apakah cara kerjanya sama dengan motor listrik yang dibahas berdasarkan **Gambar 5.21**?

Kumparan ABCD diletakkan di antara medan magnetik. Sesuai dengan kaidah tangan kanan kedua, kawat AB akan mengalami gaya magnetik *F* yang arahnya ke atas dan kawat CD akan mengalami gaya magnetik *F* yang arahnya ke bawah. Jadi, pada sisi-sisi kumparan yang berlawanan bekerja dua gaya yang sama besar, berlawanan arah, dan garis kerjanya berbeda. Kedua gaya seperti ini disebut *kopel*. Oleh karena adanya kopel ini, kumparan ABCD akan berputar searah putaran jarum jam.

Pada posisi vertikal (90°), arah gaya *F* akan segaris kerja sehingga kopel sama dengan nol. Akan tetapi, kumparan tidak langsung berhenti sebab masih memiliki kecepatan awal. Selanjutnya, dihasilkan lagi kopel sehingga kumparan dapat terus berputar. Setelah menempuh setengah putaran (180°), arus listrik yang melalui kawat AB dan CD berubah arah. Akibatnya, timbul momen kopel yang arahnya berlawanan dengan momen kopel yang pertama sehingga kumparan akan berputar kembali ke posisi semula.

Agar kumparan berputar terus-menerus, setiap ujung kumparan dihubungkan dengan cincin belah atau *komutator* yang terbuat dari tembaga. Setiap komutator ditekan oleh sikat-sikat karbon. Komutator ikut berputar bersama-sama dengan kumparan, tetapi sikat-sikat karbon tidak ikut berputar (tetap pada tempatnya). Hal ini mengakibatkan arah arus yang melalui kawat AB dan CD berubah arah setiap setengah putaran sehingga kumparan ABCD dapat berputar terus-menerus.



Gambar 5.22
Skema galvanometer

2. Galvanometer

Galvanometer adalah komponen dasar dari amperemeter, voltmeter, dan ohmmeter. Skema galvanometer ditunjukkan pada **Gambar 5.22**.

Bagian yang terpenting dari alat ukur ini adalah sebuah inti besi lunak yang dililiti kawat sehingga membentuk kumparan yang diletakkan di antara kutub utara dan selatan sebuah magnet.

Ketika arus listrik mengalir melalui kumparan, sisi-sisi kumparan yang berada di dekat kutub utara dan kutub selatan magnet akan mengalami gaya yang berlawanan arah sehingga kumparan akan berputar. Akan tetapi,

pegas spiral akan menghambat kumparan-kumparan tersebut sehingga kumparan hanya berputar dengan sudut tertentu yang besarnya sebanding dengan besar arus listrik yang mengalir melalui kumparan, yaitu besar sudut yang tidak pernah melewati batas maksimum (90°) atau kumparan hanya dapat berputar maksimum seperempat putaran, sampai kedudukan kumparan tegak lurus terhadap medan magnetik. Besarnya arus listrik yang mengalir melalui kumparan ditunjukkan oleh penyimpangan jarum penunjuk skala.

3. Pengeras Suara (*Loudspeaker*)

Hampir semua orang mengenal pengeras suara. Pengeras suara bekerja berdasarkan prinsip induksi magnetik yang memberikan gaya magnetik pada kawat berarus listrik, arus listrik bersumber dari generator AC dikirimkan melalui pesawat radio atau TV yang dihubungkan ke ujung kabel *loudspeaker*. Kabel pada *loudspeaker* dihubungkan pada sebuah kumparan kawat yang terpasang pada lorong *loudspeaker*. Selaput *loudspeaker* biasanya terbuat dari bahan elastis yang dapat bergerak maju mundur dengan bebas. Ketika arus bolak-balik dari penerima mengalir melalui kumparan kawat, kumparan dan selaput *loudspeaker* mengalami gaya yang disebabkan induksi magnetik oleh medan magnetik permanen. Melalui arus bolak-balik dengan frekuensi sinyal audio berkisar 1.000 Hz selaput *loudspeaker* bergerak maju mundur pada frekuensi yang sama. Partikel-partikel udara yang terdorong keluar oleh selaput *loudspeaker* menimbulkan rapatan dan regangan pada udara sekitarnya sehingga *loudspeaker* dapat mengubah energi listrik menjadi energi bunyi.

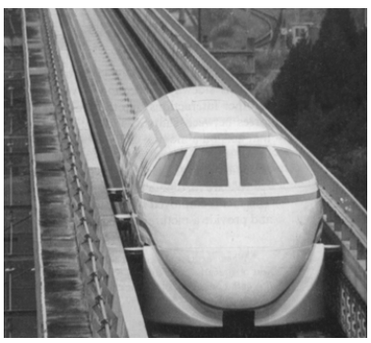
4. Kereta Api Terbang

Pernahkah Anda mendengar informasi terbaru tentang kereta api? Di negara maju seperti Jepang telah dibuat kereta api terbang. Bentuk kereta api terbang diperlihatkan **Gambar 5.23**.

Jenis kereta api terbang, Maglev Train (*Magnetically Levitation*), menggunakan prinsip gaya magnetik dalam pergerakannya. Kereta api ini bergerak tanpa menyentuh lintasan dan melayang setinggi beberapa centimeter di atas rel.

Kemampuan gaya magnetik untuk menyangga gaya berat kereta api hingga dapat melayang di atas lintasan rel dan bergerak dengan kecepatan di atas 400 km/jam adalah akibat dinding rel yang terpasang pada kedua sisi lintasan di sepanjang rel kereta api dilengkapi dengan kumparan-kumparan kawat. Berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, kumparan-kumparan tersebut dapat menjadi magnet dan kereta api dapat bergerak karena adanya interaksi antara magnet-magnet pada dinding dan magnet-magnet pada kereta. Semakin cepat laju kereta, semakin besar induksi magnetik yang diperolehnya. Ketika posisi kereta berada beberapa centimeter di bawah pusat magnet dinding, baik kutub utara dan kutub selatan dinding keduanya akan mendorong kereta ke atas yang menyebabkan kereta melayang beberapa centimeter.

Konsep gaya magnetik juga banyak digunakan dalam berbagai macam teknologi sehari-hari. Misalnya, motor listrik, tabung gambar televisi, pengeras suara, kaset radio, printer, dan *disk drive*, dengan memanfaatkan medan magnetik yang ditimbulkan oleh magnet permanen, arus listrik, dan muatan yang bergerak.

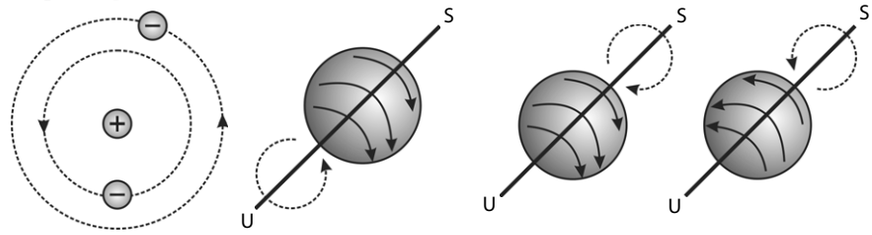


Sumber: *Science Discovery 1*, 2004

Gambar 5.23
Kereta api terbang mampu melaju dengan kecepatan lebih dari 400 km/jam.

D. Sifat Magnet Bahan

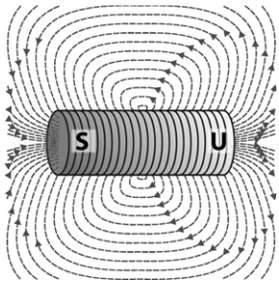
Bahan merupakan kumpulan atom atau molekul. Di dalam atom atau molekul terdapat elektron bermuatan negatif. Elektron mengelilingi inti atom sehingga merupakan arus listrik yang bergerak melingkar. Elektron-elektron juga melakukan gerak rotasi yang dinamakan spin elektron. Pada atom, spin elektron ada yang berpasangan dan ada juga yang tidak berpasangan. Perhatikan **Gambar 5.23**.



Gambar 5.24
(a) Gerak melingkar elektron mengelilingi inti; (b) Spin elektron tidak berpasangan; (c) Spin elektron berpasangan.

Kemagnetan bahan ditentukan oleh spin elektron dan gerak elektron mengelilingi inti. Spin elektron tidak berpasangan bersifat sebagai magnet kecil, sedangkan spin elektron yang berpasangan tidak menimbulkan sifat kemagnetan.

Berdasarkan tanggapan bahan terhadap suatu magnet, bahan dikelompokkan menjadi tiga jenis, yaitu bahan *ferromagnetik*, bahan *paramagnetik*, dan bahan *diamagnetik*.

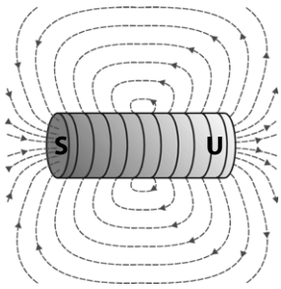


Gambar 5.25
Bahan ferromagnetik dalam solenoida

1. Bahan Ferromagnetik

Bahan ini jika didekati magnet akan tertarik dengan kuat. Begitu juga jika berada dalam medan magnetik akan menimbulkan kuat medan yang besar. Dengan demikian, dikatakan bahwa bahan ferromagnetik memiliki *suseptibilitas positif* (kecenderungan untuk mudah menjadi magnet), dan *permeabilitas* bahan lebih besar dari udara $(\mu > \mu_0)$. Atom di dalam bahan ferromagnetik mengandung banyak elektron dengan *spin tidak berpasangan* sehingga mudah untuk mengumpulkan garis-garis medan magnetik, seperti **Gambar 5.25**.

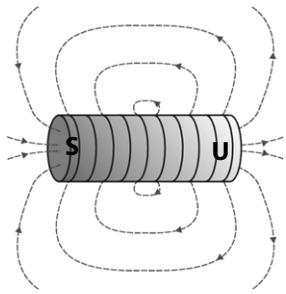
Bahan ferromagnetik sering digunakan untuk membuat magnet tetap, seperti besi, nikel, kobalt, dan baja. Jika suhu bahan dinaikkan bahkan dapat sampai 770°C (suhu Curie), sifat ferromagnetiknya akan berubah atau bahkan dapat hilang.



Gambar 5.26
Bahan paramagnetik dalam solenoida

2. Bahan Paramagnetik

Bahan yang sedikit menarik garis-garis medan magnetik dinamakan bahan paramagnetik. Perhatikan **Gambar 5.26**. Di dalam atomnya, terdapat *sedikit elektron* dengan *spin tidak berpasangan* sehingga bahan ini memiliki suseptibilitas positif kecil, tetapi memiliki permeabilitas di atas permeabilitas udara $(\mu > \mu_0)$. Contoh bahan ini adalah aluminium, magnesium, wolfram, platinum, dan tembaga (II) sulfida.



Gambar 5.27
Bahan diamagnetik dalam solenoida

3. Bahan Diamagnetik

Bahan diamagnetik memiliki *suseptibilitas negatif*. Elektron-elektron dalam atomnya hampir *semuanya berpasangan* sehingga medan magnetiknya saling meniadakan. Akibatnya, bahan diamagnetik sukar menarik

garis-garis gaya magnetik dari luar sepeti ditunjukkan pada **Gambar 5.27**. Bahan ini memiliki permeabilitas lebih kecil dari permeabilitas udara $(\mu < \mu_0)$. Contohnya seng, perak, emas, bismut, dan perak.

4. Suhu Curie

Sifat kemagnetan bahan ferromagnetik dapat berubah. Jika dipanaskan sifat ferromagnetik suatu bahan akan hilang dan berubah menjadi bahan paramagnetik, jika suhu bahan dinaikkan melebihi suatu nilai tertentu disebut suhu Curie. Pada **Tabel 5.1** disajikan suhu Curie dari beberapa bahan ferromagnetik.

Tabel 5.1
Suhu Curie Beberapa Bahan Ferromagnetik

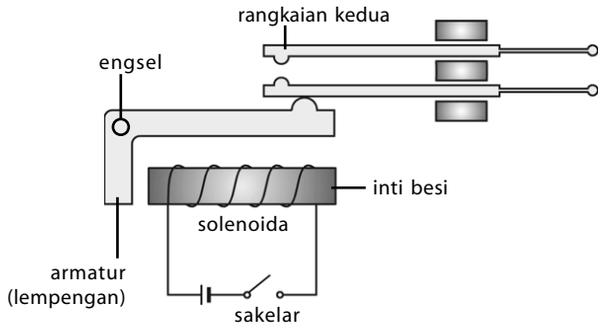
No.	Bahan	Suhu Curie (°C)
1.	Gadolinium	116
2.	Nikel	358
3.	Besi	770
4.	Kobalt	113

Sumber: *Physics for Scientists and Engineers, 3rd Edition,* 2000

5. Penerapan Bahan Ferromagnetik

a. Relai Magnetik (Penghubung)

Relai magnetik adalah sebuah alat yang menggunakan prinsip elektromagnetik dalam sebuah rangkaian untuk menghidupkan rangkaian yang lain. Alat ini terdiri atas inti besi lunak yang dililit oleh sebuah kumparan (solenoida) di sekelilingnya. Sebuah armatur (lempengan) berbentuk L terbuat dari plat baja yang dapat bergerak bebas dalam rangkaian ditempatkan, seperti tampak pada **Gambar 5.28**.



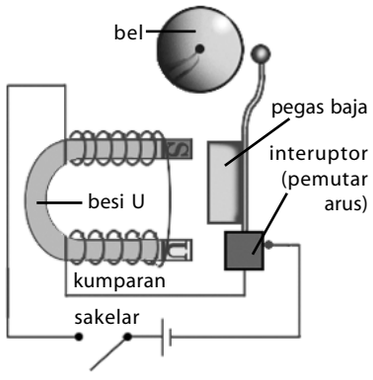
Gambar 5.28
Skema rangkaian relai magnetik

Ketika sakelar terhubung, arus segera mengalir dalam rangkaian pertama melalui sebuah kumparan solenoida. Akibatnya, inti besi lunak menjadi bersifat magnetik yang dapat menarik armatur. Ujung bagian atas armatur terangkat dan menutup sakelar penghubung pada rangkaian kedua. Selanjutnya, arus pada rangkaian pertama diteruskan ke rangkaian kedua. Relai magnetik banyak digunakan pada hubungan telepon dan *starting motor* (kendaraan).

b. Bel Listrik

Bahan ferromagnetik juga biasa digunakan pada bel listrik. Pada rangkaian bel listrik, inti besi dililit kawat dengan tujuan memperkuat medan magnetik di sekitarnya. Rangkaian bel listrik sederhana ditunjukan seperti **Gambar 5.29**.

Ketika sakelar ditekan, arus listrik mengalir dari sumber tegangan menuju pegas baja dan mengalir ke kumparan kawat yang melilit pada magnet U. Arus listrik yang mengalir pada kumparan menyebabkan induksi elektromagnetik pada besi U sehingga bersifat magnet dan menarik besi lunak yang melekat pada pegas baja. Akibatnya, pegas baja memukul bel sehingga bel berbunyi. Pada saat yang sama ketika bel berbunyi, hubungan antara interuptor dan sumber tegangan terputus sehingga besi U tidak bersifat magnet lagi dan pegas baja kembali ke keadaan semula. Kemudian, sumber tegangan kembali berhubungan dengan interuptor dan proses yang sama terjadi kembali.



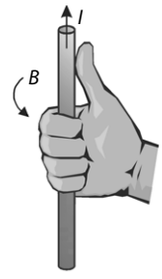
Gambar 5.29
Skema rangkaian bel listrik

Rangkuman

1. Medan magnetik adalah daerah di sekitar magnet di mana magnet-magnet lain atau benda-benda magnetik yang diletakkan dalam daerah ini masih dipengaruhi magnet tersebut.
2. Fluk magnetik adalah banyaknya garis medan magnetik yang dilingkupi oleh suatu luas daerah tertentu dalam arah gerak lurus.

 $$\Phi = BA\cos\theta$$

 dengan θ adalah sudut antara B dan garis normal n pada bidang.
3. Hans Christian Oersted menemukan fakta bahwa di sekitar kawat berarus listrik terdapat medan magnetik. Arah medan magnetik di sekitar kawat berarus dapat ditentukan dengan kaidah tangan kanan.



4. Hukum Biot-Savart menyatakan bahwa besarnya induksi magnetik di sekitar kawat berarus listrik:
 a. berbanding lurus dengan kuat arus listrik;
 b. berbanding lurus dengan panjang elemen penghantar;
 c. berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kawat berarus dengan titik medan magnetik yang diukur;
 d. berbanding lurus dengan sinus sudut apit antara arah arus dan garis jarak dari kawat berarus ke titik medan magnetik yang diukur.

 Secara matematis dirumuskan sebagai berikut.

 $$dB = k\frac{Id\ell\sin\theta}{r^2}$$

5. Besarnya induksi magnetik pada beberapa bentuk kawat adalah sebagai berikut.
 a. Pada sekitar kawat lurus

 $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$, dengan a jarak dari kawat berarus ke titik medan magnetik.
 b. Pada pusat kawat melingkar

 $B = \frac{\mu_0 IN}{2a}$, dengan N jumlah lilitan kawat.
 c. Pada pusat solenoida

 $B = \frac{\mu_0 IN}{\ell}$, dengan ℓ panjang solenoida.
 d. Pada sumbu toroida

 $B = \frac{\mu_0 N}{2\pi a}$.
6. Gaya magnetik adalah gaya yang dialami kawat berarus ketika berada di dalam medan magnetik. Arah gaya magnetik dapat ditentukan dengan menggunakan kaidah tangan kanan. Secara matematis, arah gaya magnetik dapat ditulis sebagai berikut.
 $\mathbf{F} = BI\ell\sin\theta$, dengan θ sudut yang dibentuk antara ℓ dengan B.
7. Pada muatan yang bergerak dalam medan magnetik bekerja gaya magnetik dan gaya sentripetal yang sama besar. Secara matematis, ditulis sebagai berikut.

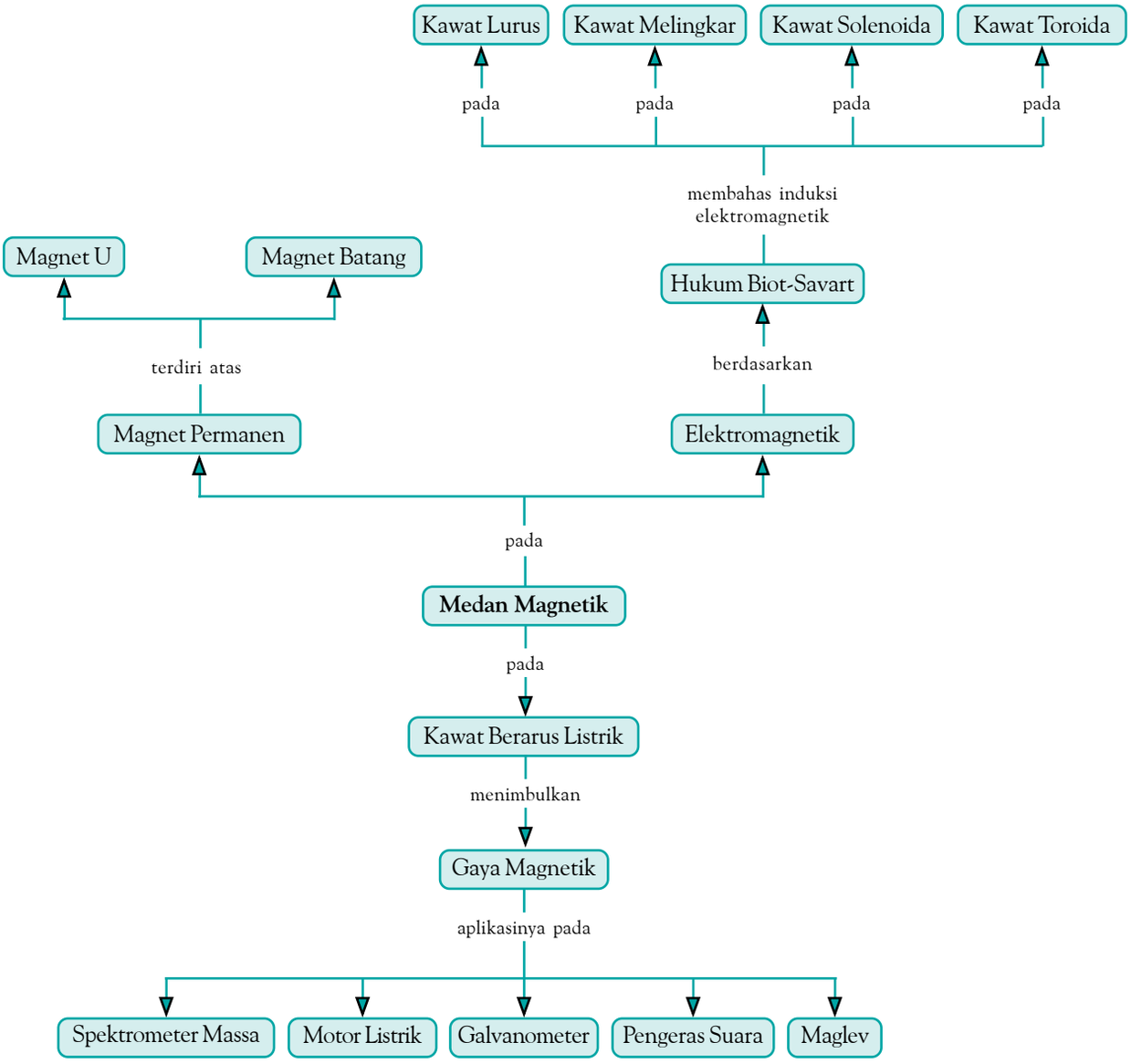
 $$Bqv = \frac{mv^2}{r} \quad \text{atau} \quad r = \frac{mv}{Bq}$$

8. Pada dua kawat berarus yang sejajar bekerja gaya magnetik. Gaya tarik-menarik terjadi jika arus pada kedua kawat arahnya sama. Gaya tolak-menolak terjadi jika arus pada kedua kawat arahnya berlawanan. Secara matematis besar gaya tersebut adalah

 $$F = \frac{\mu_0 I_1 \cdot I_2 \ell}{2\pi a}$$

9. Aplikasi gaya magnetik terdapat pada motor listrik, galvanometer, pengeras suara, relai magnetik, bel listrik, dan lain-lain.
10. Berdasarkan tanggapan suatu bahan terhadap suatu magnet, bahan dikelompokkan menjadi tiga jenis, yaitu bahan ferromagnetik, bahan paramagnetik, dan bahan diamagnetik.

Peta Konsep



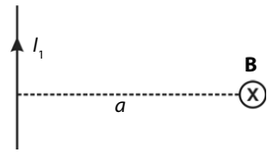
Refleksi

Setelah Anda mempelajari materi bab ini, Anda tentu dapat memahami bahwa medan magnetik dihasilkan dari magnet permanen dan kawat berarus. Anda tentu memahami juga pengaruh medan magnetik pada kawat berarus serta pemanfaatan fenomena tersebut dalam teknologi. Dari materi yang ada pada bab ini, bagian manakah yang menurut Anda sulit dipahami? Coba Anda diskusikan dengan teman atau guru Fisika Anda. Selain itu, coba Anda cari manfaat dan aplikasi lain dari materi-materi bab ini.

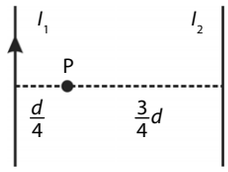
Tes Kompetensi Bab 5

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan.

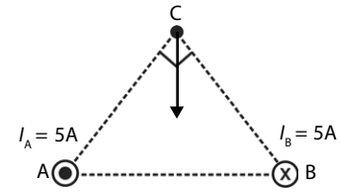
1. Kawat berarus listik memanjang dari barat ke timur. Jika arah arus listrik pada kawat tersebut dari barat, arah medan magnetik pada titik-titik yang berada di atas kawat akan menuju ke
 a. atas
 b. bawah
 c. utara
 d. selatan
 e. barat
2. Arus listrik mengalir sepanjang kawat listrik tegangan tinggi dari selatan ke utara. Arah medan magnetik yang diakibatkan arus listrik di atas kawat tersebut adalah
 a. selatan
 b. utara
 c. timur
 d. barat
 e. tenggara
3. Sebuah penghantar yang dialiri arus listrik I menimbulkan induksi magnetik B di suatu titik yang berjarak a dari penghantar seperti tampak pada gambar berikut.



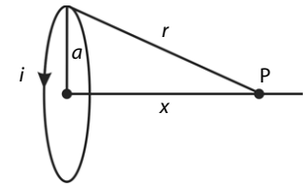
 Jika kuat arusnya diperbesar menjadi $2I$, dan jarak dari penghantar menjadi $3a$, induksi magnetiknya menjadi
 a. $\frac{2}{3}B$
 b. $\frac{3}{2}B$
 c. $2B$
 d. $3B$
 e. $6B$
4. Dua kawat sejajar, kawat pertama dialiri arus $I = 2$ A ke atas seperti pada gambar.



 Agar induksi magnetik di titik P sama dengan nol, arus yang mengalir pada kawat kedua adalah
 a. 6 A ke atas
 b. 6 A ke bawah
 c. $\frac{2}{3}$ A ke atas
 d. $\frac{2}{3}$ A ke bawah
 e. $\frac{3}{2}$ A ke atas
5. Dua kawat yang lurus dan panjang terpisah pada jarak $2a$. Kedua kawat dialiri arus yang sama besar dengan arah berlawanan. Induksi magnetik di tengah-tengah antara kedua kawat adalah B. Induksi magnetik di titik yang berjarak a dari kawat pertama dan berjarak $3a$ dari kawat kedua adalah
 a. 0
 b. $\frac{1}{3}B$
 c. $\frac{1}{2}B$
 d. $2B$
 e. $3B$
6. Segitiga ABC sama kaki dan siku-siku di titik C. Arus listrik mengalir pada titik A dan B secara tegak lurus pada bidang gambar sesuai dengan tanda ⊙ dan ⊗ dengan $I_A = I_B = 5$ A.

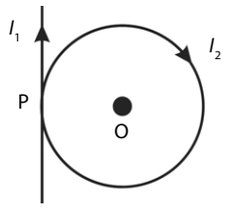


 Besar induksi magnetik di titik C jika AC = BC = 2 cm dan $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Wb/Am adalah
 a. 5×10^{-5} T
 b. 5×10^{-9} T
 c. 10^{-4} T
 d. $5 \times 10^{-5}\sqrt{2}$ T
 e. $5 \times 10^{-9}\sqrt{2}$ T
7. Sebuah kawat yang berbentuk lingkaran terdiri atas 20 lilitan. Jari-jari lingkaran = 10 cm. Agar induksi magnetik di pusat lingkaran sama dengan $4\pi \times 10^{-3}$ T, besar arus listrik yang harus diberikan adalah
 a. 1 A
 b. 5 A
 c. 10 A
 d. 50 A
 e. 100 A
8. Besarnya induksi magnetik di P karena pengaruh kawat berupa lingkaran dengan $i = 10$ A, $x = 6$ cm, dan $a = 8$ cm adalah



 a. $1{,}28\pi \times 10^{-7}$ Wb/m^2
 b. $6{,}40\pi \times 10^{-7}$ Wb/m^2
 c. $1{,}28\pi \times 10^{-6}$ Wb/m^2
 d. $6{,}40\pi \times 10^{-6}$ Wb/m^2
 e. $1{,}28\pi \times 10^{-5}$ Wb/m^2

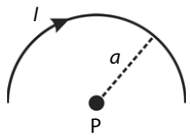
9. Dua buah kawat yang satu melingkar dan yang lain lurus. Kedua kawat hampir berimpit di titik P. Kawat melingkar berarus listrik A dan berjari-jari 2 cm, sedangkan kawat lurus berarus listrik 6 A dengan arah seperti pada gambar.



Besar induksi magnetik di pusat lingkaran O akibat dua arus tersebut adalah

a. 2×10^{-5} T
b. 4×10^{-5} T
c. 6×10^{-5} T
d. 8×10^{-5} T
e. 25×10^{-5} T

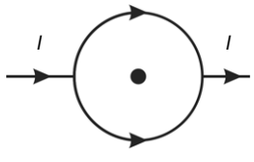
10. Kawat berupa setengah lingkaran seperti gambar berikut memiliki jari-jari *a*.



Induksi magnetik di titik P memenuhi persamaan

a. $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$
b. $B = \frac{\mu_0 I}{2a}$
c. $B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a}$
d. $B = \frac{\mu_0 I}{4a}$
e. $B = \frac{\mu_0 I}{\pi a}$

11. Arus listrik pada kawat tidak berhambatan seperti pada gambar berikut.



Jika jari-jari lingkaran adalah *a*, besar induksi magnetik di titik pusat lingkaran

a. nol
b. $\frac{\mu_0 I}{2\pi a}$
c. $\frac{\mu_0 I}{2a}$
d. $\frac{\mu_0 I}{4\pi a}$
e. $\frac{\mu_0 I}{4a}$

12. Arus listrik sebesar 2A mengalir dalam penghantar berbentuk lingkaran berjari-jari 3 cm, dan terletak pada bidang horizontal. Titik P terletak pada sumbu lingkaran pada jarak 4 cm dari pusatnya. Jika dilihat dari P, arah arus itu sesuai dengan arah putaran jarum jam, besar dan arah induksi magnetik di titik P adalah

a. $2{,}50\pi \times 10^{-5}$ T ke atas
b. $3{,}01\pi \times 10^{-7}$ T ke bawah
c. $4{,}50\pi \times 10^{-7}$ T ke bawah
d. $3{,}14\pi \times 10^{-7}$ T ke atas
e. $2{,}88\pi \times 10^{-6}$ T ke bawah

13. Suatu solenoida yang panjangnya 2 m, terdiri atas 800 lilitan, dan jari-jari 2 cm dialiri arus listrik sebesar 0,5 A. Besar induksi magnetik di ujung solenoida adalah

a. $4\pi \times 10^{-8}$ T
b. $8\pi \times 10^{-7}$ T
c. $4\pi \times 10^{-5}$ T
d. $8\pi \times 10^{-5}$ T
e. $2\pi \times 10^{-4}$ T

14. Sebuah solenoida memiliki panjang 20 cm dan terdiri atas 50 lilitan. Jika induksi magnetik di tengah-tengah solenoida $= 2\pi \times 10^{-4}$ T, arus yang mengalir pada solenoida adalah

a. 2×10^{-2} A
b. 4×10^{-2} A
c. 2 A
d. 4 A
e. 10 A

15. Dalam solenoida panjang mengalir arus yang tetap. Besar induksi magnetik di titik pusatnya adalah *B*. Jika solenoida direnggangkan sehingga dua kali semula, induksi magnetik di titik pusatnya menjadi

a. $\frac{B}{\sqrt{2}}$
b. $\frac{B}{2}$
c. B
d. $B\sqrt{2}$
e. $2B$

16. Arus listrik 15 A mengalir dalam suatu kumparan kawat melingkar yang memiliki 30 lilitan dan jari-jari 20 cm. Induksi magnetik di pusat kumparan tersebut adalah

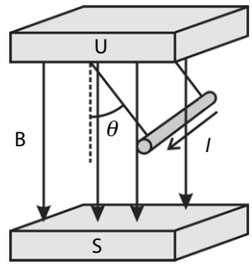
a. $1{,}4\pi \times 10^{-4}$ T
b. $1{,}4\pi \times 10^{-3}$ T
c. $4{,}5\pi \times 10^{-3}$ T
d. $4{,}5\pi \times 10^{-4}$ T
e. $5\pi \times 10^{-3}$ T

17. Toroida dengan jari-jari 5 cm terdiri atas 750 lilitan. Arus listrik yang mengalir pada toroida agar induksi magnetik yang terjadi di dalam toroida $1{,}8 \times 10^{-3}$ T adalah

a. 0,3 A
b. 0,6 A
c. 1,0 A
d. 1,8 A
e. 2,5 A

18. Sebuah solenoida panjang memiliki 5 lilitan per cm panjang. Ketika 0,8 A mengalir melalui solenoida tersebut, induksi magnetik pada sebuah titik yang terletak pada sumbu solenoida jika titik tersebut berada di tengah-tengah solenoida adalah
 a. $1{,}6\pi \times 10^{-4}$ Wb/m^2
 b. $1{,}6\pi \times 10^{-5}$ Wb/m^2
 c. $5\pi \times 10^{-4}$ Wb/m^2
 d. $5\pi \times 10^{-3}$ Wb/m^2
 e. $2{,}5\pi \times 10^{-4}$ Wb/m^2

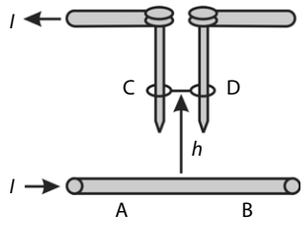
19. Sepotong logam penghantar yang panjangnya 0,2 m dan massanya 0,08 kg digantungkan pada atap ruangan melalui dua utas tali tanpa bobot sehingga logam penghantar tergantung horizontal seperti tampak pada gambar berikut.



Di dalam ruangan terdapat medan magnetik dari atap ke lantai dengan induksi magnetik $B = 75$ mT. Jika kuat arus yang mengalir $I = 40$ A, logam penghantar akan menyimpang sehingga membentuk sudut θ terhadap vertikal. Tentukanlah besar sudut θ adalah
 a. 30°
 b. 37°
 c. 45°
 d. 53°
 e. 60°

20. Pada dua buah kawat sejajar yang masing-masing dialiri arus listrik yang sama besar, timbul gaya yang besarnya 2×10^{-7} N. Jarak antara kedua kawat itu 1 m. Besar arus yang mengalir dalam setiap kawat adalah
 a. $\frac{1}{8}$ A
 b. $\frac{1}{4}$ A
 c. $\frac{1}{2}$ A
 d. 1 A
 e. 2 A

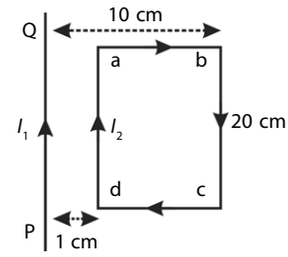
21. Suatu kawat horizontal AB yang panjang terletak di atas meja. Kawat CD sepanjang 30 cm terletak vertikal di atas kawat AB dengan ujung C dan D bebas bergerak seperti tampak pada gambar.



Arus listrik yang mengalir melalui sistem kawat adalah $I = 50$ A dengan arah yang sesuai dengan notasi pada gambar. Jika kawat CD memiliki massa per satuan panjang 5×10^{-3} kg/m dan kawat CD dalam keadaan seimbang, ketinggian h adalah
 a. 0,5 cm
 b. 1 cm
 c. 2 cm
 d. 2,5 cm
 e. 5 cm

22. Besar kuat medan magnetik di suatu titik yang letaknya sejauh r dari suatu pengantar lurus yang dialiri arus I adalah sebanding dengan
 a. I
 b. rI
 c. $\frac{r}{I}$
 d. $\frac{I}{r}$
 e. $\frac{I}{rI}$

23. Pada gambar tampak bahwa kawat lurus PQ sangat panjang dan dilalui arus listrik $I_1 = 10$ A dan kawat persegipanjang abcd dilalui arus $I_2 = 5$ A.



Resultan gaya yang dialami kawat persegipanjang abcd dalam μN adalah
 a. 20
 b. 60
 c. 120
 d. 180
 e. 220

24. Partikel bermuatan q bergerak dengan laju tetap memasuki medan magnetik dan medan listrik secara tegak lurus (medan listrik tegak lurus medan magnetik). Apabila besar induksi magnetik 0,2 T dan kuat medan listrik 6×10^4 V/m, laju gerak partikel adalah
 a. 2×10^5 m/s
 b. 3×10^5 m/s
 c. $1{,}2 \times 10^5$ m/s
 d. 2×10^6 m/s
 e. $3{,}2 \times 10^6$ m/s

25. Sebuah elektron ($m = 9 \times 10^{-31}$ kg, dan $q = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C) dari keadaan diam dipercepat oleh beda potensial 8 kV. Elektron kemudian masuk dalam magnet homogen $B = 3 \times 10^{-3}$ T secara tegak lurus. Jari-jari lintasan elektron dalam medan magnetik tersebut
 a. 18 cm
 b. 16 cm
 c. 14 cm
 d. 12 cm
 e. 10 cm

26. Dua buah partikel massanya $m_1 : m_2 = 2 : 1$ dan muatannya $q_1 : q_2 = 2 : 1$. Kedua partikel tersebut bergerak melingkar dalam bidang yang tegak lurus medan magnetik homogen. Jika besar momentum kedua partikel itu sama, perbandingan jari-jari orbit partikel-partikel itu $r_1 : r_2$, adalah
 a. 4 : 1
 b. 2 : 1
 c. 1 : 1
 d. 1 : 2
 e. 1 : 4
27. Sebuah parikel bermuatan listrik bergerak masuk ke dalam medan magnetik sedemikian rupa sehingga lintasannya berupa lingkaran dengan jari-jari 10 cm. Jika partikel lain bergerak dengan laju 1, 2 kali partikel pertama, jari-jari lingkarannya 20 cm. Ini berarti bahwa perbandingan antara massa per muatan partikel pertama dan partikel kedua adalah
 a. 3 : 5
 b. 4 : 5
 c. 1 : 2
 d. 5 : 6
 e. 5 : 4
28. Sebuah elektron dengan kecepatan v di dalam medan magnetik yang induksi magnetiknya B. Jika v ada dalam bidang xy membentuk sudut 60° dengan sumbu x dan B sejajar dengan sumbu y, lintasan elektron berbentuk
 a. garis lurus sejajar sumbu y
 b. garis lurus sejajar sumbu x
 c. lingkaran sejajar sumbu y
 d. lingkaran sejajar sumbu x
 e. spiral dengan sumbunya sejajar sumbu y
29. Sebuah partikel bermuatan listrik bergerak memasuki ruang yang mengandung medan listrik dan medan magnetik saling tegak lurus dan juga tegak lurus pada kecepatan partikel. Jika besar induksi magnetik = 0,4 T dan kuat medan listrik = 8×10^4 V/m, dan partikel bergerak lurus, kecepatan partikel tersebut adalah
 a. 4×10^5 m/s
 b. 2×10^5 m/s
 c. 5×10^5 m/s
 d. $3{,}2 \times 10^5$ m/s
 e. 5×10^6 m/s
30. Sebuah medan magnetik 0,4 T ternyata dapat membelokkan gerak muatan listrik 5 C berkecepatan 5×10^4 m/s sehingga memiliki lintasan berbentuk lingkaran dengan jari-jari 2 cm. Massa ion tersebut adalah
 a. $0{,}8 \times 10^{-6}$ kg
 b. $0{,}8 \times 10^{-4}$ kg
 c. $0{,}4 \times 10^{-6}$ kg
 d. $0{,}4 \times 10^{-4}$ kg
 e. $0{,}5 \times 10^{-4}$ kg

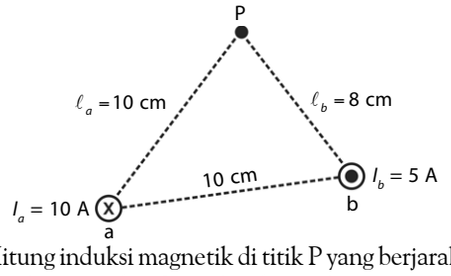
B. Jawablah pertanyaan berikut ini dengan tepat.

1. Tentukan arah induksi magnetik di titik P, Q, dan R dari gambar-gambar berikut.
 a. 

 b. 

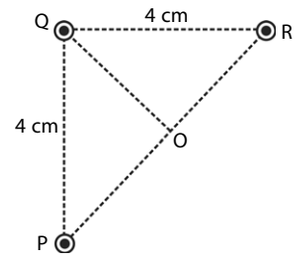
 c. 

2. Sepotong kawat yang lurus panjang berarus listrik 1 A. Di mana titik yang memiliki induksi magnetiknya 2×10^{-5} Wb/m^2?
3. Dua buah kawat (a dan b) lurus panjang terletak sejajar. Kawat tersebut dialiri listrik yang berlawanan arah masing-masing 10 A dan 5 A. Perhatikan gambar.



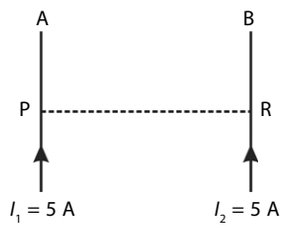
Hitung induksi magnetik di titik P yang berjarak 10 cm dari kawat a dan 8 cm dari kawat b.

4. Tiga buah kawat PQR lurus panjang, berarus listrik dangan arah sama $I_P = I_R = 2$A dan $I_Q = 4$ A; PQ $\perp$ QR ; jarak PQ = QR = 4 cm seperti tampak pada gambar.



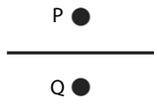
Hitunglah induksi magnetik di titik O.

5. Dua kawat A dan B lurus panjang berjarak 10 cm satu sama lainnya, berarus listrik seperti tampak pada gambar.



 a. Di titik manakah medan magnetik memiliki harga nol?
 b. Tentukan jarak titik itu terhadap kawat.

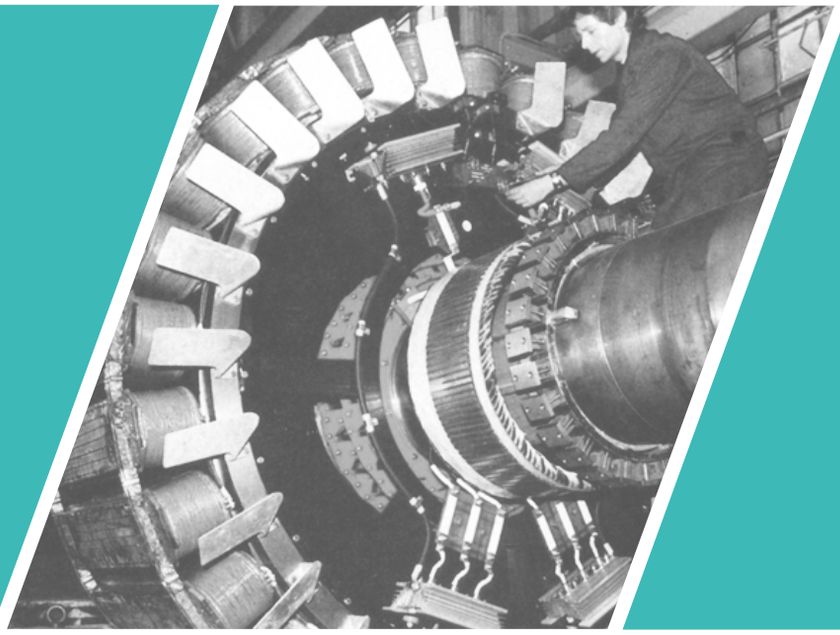
6. Sebuah kawat berarus listrik.



Tentukan arah medan magnetik *B* di titik P, Q jika:
 a. arus dari kiri ke kanan;
 b. arus dari kanan ke kiri.
7. Sebuah titik dari udara berjarak 5 cm dari sebuah kawat lurus dan panjang yang mengalirkan arus 30 A. Berapa rapat fluks magnetik (induksi magnetik) di titik itu?
8. Induksi magnetik sebuah titik yang berada pada jarak 40 cm dari kawat panjang berarus 0,01 Wb/m^2. Berapa arus yang mengalir dalam kawat?
9. Dua buah kawat panjang lurus dan sejajar berada pada jarak 60 cm, masing-masing dialiri arus sebesar 2 A dan 3 A. Hitunglah besar induksi magnetik di titik P yang berada di tengah-tengah kedua kawat, jika arah arus pada kawat sama.
10. Dua buah kawat panjang lurus, dan sejajar berada pada jarak 20 cm, masing-masing dialiri arus 3 A dan 1 A, berlawanan arah. Di mana letak titik P yang memiliki induksi magnetik nol?
11. Sebuah kawat berbentuk lingkaran dengan jari-jari 24 cm. Jika pada kawat diberikan arus sebesar 12 A, hitunglah induksi dari titik P yang berada:
 a. di pusat lingkaran;
 b. di sumbu pusat lingkaran yang berada pada jarak 18 cm dari pusat lingkaran.
12. Sebuah kawat dibentuk menjadi $\frac{3}{4}$ lingkaran dengan jari-jari 10 cm. Hitunglah induksi titik P yang berada di pusat lingkaran apabila arus yang mengalir pada kawat 20 A.
13. Dua buah lingkaran masing-masing berdiameter 12 cm, diletakkan vertikal sejajar di satu sumbu pada jarak 8 cm. Arus yang diberikan pada jarak 8 cm. Arus yang diberikan pada kedua lingkaran sama, yaitu 12 A. Berapa besarnya induksi titik P yang berada di tengah-tengah sumbu jika:
 a. arah arus pada kedua lingkaran sama;
 b. arah arus pada kedua lingkaran berlawanan.
14. Sebuah solenoida panjangnya 25 cm dan jumlah lilitan kawatnya 200 lingkaran. Jika arus yang diberikan pada solenoida 20 A, hitunglah induksi magnetik di pusat solenoida tersebut.
15. Sebuah solenoida panjangnya 1 m, jari-jarinya 5 cm, dan jumlah lilitannya 500. Jika solenoida dialiri arus listrik, dihasilkan fluks magnetik di dalamnya sebesar 0,000296 Wb, berapa arus yang ada dalam solenoida?
16. Sebuah solenoida panjangnya 1 m, diameter 16 cm, dan jumlah lilitannya 400. Jika dialirkan arus listrik sebesar 8 A, berapa fluks magnetik di ujung solenoida?
17. Sebuah toroida memiliki jari-jari dalam 20 cm dan jari-jari luar 30 cm terdiri atas sejumlah lilitan kawat. Jika arus yang diberikan sebesar 16 A, dihasilkan induksi magnetik pusat sebesar 0,0016 Wb/m^2, berapa jumlah lilitan kawat toroida tersebut?
18. Sepotong kawat yang dialiri arus listrik dengan arah ke barat diletakkan dalam medan magnetik yang arahnya ke atas. Ke mana arah gaya yang dialami kawat tersebut?
19. Suatu penghantar lurus yang panjangnya 20 cm berarus listrik 5 A, diletakkan dalam medan magnetik dengan induksi magnetik 1 Wb/m^2. Jika penghantar itu mengapit sudut 60° terhadap medan magnetik, berapa gaya yang bekerja pada kawat?
20. Sebuah toroida terdiri atas 1.000 lilitan, jari-jari dalamnya $R_1 = 25$ cm dan jari-jari luarnya $R_2 = 75$ cm. Besar induksi magnetik di titik pusat toroida 8×10^{-7} Wb/m^2. Berapa arus yang mengalir pada toroida?

Bab

6



Sumber: *Physics Today*, 1989

Generator listrik mampu mengubah energi kinetik menjadi energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik.

Induksi Elektromagnetik

Hasil yang harus Anda capai:

menerapkan konsep kelistrikan dan kemagnetan dalam berbagai penyelesaian masalah dan produk teknologi.

Setelah mempelajari bab ini, Anda harus mampu:

memformulasikan konsep induksi Faraday dan arus bolak-balik, keterkaitannya, serta aplikasinya.

Pada Bab 5, Anda telah mempelajari medan magnet yang ditimbulkan oleh kawat berarus listrik. Gejala ini telah diamati oleh **Hans Christian Oersted** pada 1819. Tahukah Anda bahwa perubahan medan magnet dapat menimbulkan arus listrik.

Gejala ini dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik yang digunakan untuk berbagai keperluan. Sebagai contoh, seperti tampak pada gambar, sebuah generator raksasa digunakan sebagai sumber listrik. Generator ini memanfaatkan gejala induksi elektromagnetik. Apakah induksi elektromagnetik itu? Adakah pemanfaatan lain dari induksi elektromagnetik selain generator? Besaran-besaran apa saja yang terlibat dalam induksi elektromagnetik? Jawaban atas pertanyaan-pertanyaan tersebut dapat Anda temukan dalam bab ini. Oleh karena itu, pelajarilah bab ini dengan baik.

A. Gejala Induksi Elektromagnetik

B. Aplikasi Induksi Elektromagnetik Faraday

C. Arus dan Tegangan Listrik Bolak-balik

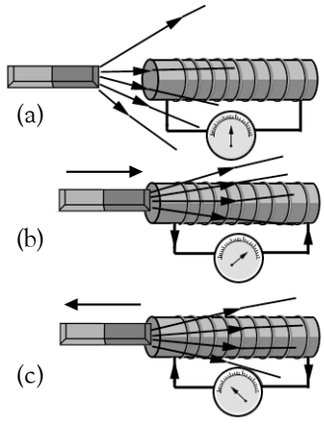
Tes Kompetensi Awal

Sebelum mempelajari konsep Induksi Elektromagnetik, kerjakanlah soal-soal berikut dalam buku latihan.

1. Pada materi bab sebelumnya Anda telah mengenal Oersted dengan penemuannya tentang arus listrik. Bagaimanakah hasil eksperimennya? Mungkinkah fenomena kebalikannya terjadi? Siapakah yang membuktikannya?
2. Menurut Anda, mengapa transformator selalu dihubungkan dengan arus bolak-balik? Apa yang akan terjadi jika transformator dihubungkan pada arus searah?
3. Tahukah Anda ada berapa jenis transformator berdasarkan fungsinya?
4. Apakah perbedaan kapasitor dan induktor berdasarkan jenis arus yang dapat melaluinya?

A. Gejala Induksi Elektromagnetik

1. Pengertian Induksi Elektromagnetik



Gambar 6.1
Induksi elektromagnetik (a) ketika magnet diam, jarum galvanometer juga diam, (b) ketika magnet dimasukkan ke dalam kumparan, jarum galvanometer bergerak ke kanan, dan (c) ketika magnet dikeluarkan dari dalam kumparan, jarum galvanometer bergerak ke kiri.

Hans Christian Oersted telah berhasil membuktikan bahwa arus listrik dapat menimbulkan medan magnetik. Dua belas tahun kemudian setelah penemuan Oersted, seorang ahli fisika bernama **Michael Faraday** (1791–1867) pada 1831, melalui serangkaian eksperimen yang dilakukannya, berhasil menemukan fakta kebalikannya bahwa *medan magnetik dapat menimbulkan arus listrik*. Gejala ini dinamakan *induksi elektromagnetik* atau *imbas elektromagnetik*, atau sering pula disebut *induksi Faraday*. Perhatikan **Gambar 6.1**.

Gambar 6.1 menunjukkan peralatan sederhana seperti yang digunakan oleh **Michael Faraday**. Ketika batang magnet digerakkan menuju kumparan dan menjauhi kumparan, jarum galvanometer bergerak/menyimpang. Artinya, dalam kawat penghantar mengalir arus listrik. Berdasarkan fakta tersebut, dapat disimpulkan bahwa *jika sebuah kumparan mengalami perubahan jumlah garis-garis gaya magnetik (fluks magnetik), pada ujung-ujung kawat kumparan timbul gaya gerak listrik* (ggl). Jika ujung-ujung kumparan ini dihubungkan dengan rangkaian tertutup, pada rangkaian tersebut akan mengalir arus listrik. Arus yang mengalir tersebut dinamakan arus induksi. Adapun ggl pada ujung-ujung kawat disebut ggl induksi.

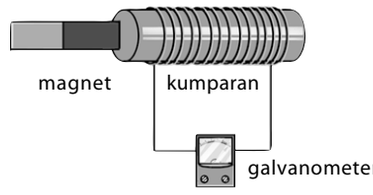
Aktivitas Fisika 6.1

Induksi Elektromagnetik

Tujuan Percobaan
Mengamati arus induksi

Alat-Alat Percobaan
1. Kumparan
2. Galvanometer
3. Magnet batang

Langkah-Langkah Percobaan
1. Susunlah peralatan seperti gambar berikut.



2. Siapkan magnet batang, kemudian dekatkan pada kumparan, dan diamkan. Catat hasil pengamatan Anda.
3. Gerakkan magnet mendekati kumparan atau masukkan ke dalam kumparan. Amati jarum galvanometer dan catat hasil pengamatannya.
4. Diamkan magnet batang di dalam kumparan. Amati jarum galvanometer dan catat hasil pengamatannya.
5. Gerakkan magnet batang dengan arah menjauhi kumparan atau keluar kumparan, amati jarum galvanometer, dan catat hasil pengamatannya.
6. Balikkan polaritas magnet batang, lakukan lagi percobaan langkah 2 dan langkah 5. Catat hasil pengamatannya.
7. Tulis kesimpulan Anda tentang kegiatan ini.

2. Hukum Faraday

Ggl induksi dihasilkan dari proses induksi elektromagnetik. Ggl induksi timbul jika ada perubahan fluks medan magnet ($\Delta\Phi$) di dalam kumparan. Ggl induksi inilah yang menyebabkan mengalirnya arus listrik induksi pada suatu rangkaian tertutup.

Besarnya ggl induksi bergantung kepada faktor-faktor sebagai berikut.

a. *Laju perubahan fluks medan magnet dalam kumparan*. Semakin besar laju perubahannya, semakin besar pula ggl yang dihasilkan.
b. *Jumlah lilitan kumparan*. Semakin banyak jumlah lilitan kumparan, semakin besar pula ggl yang dihasilkan.

Berdasarkan hasil eksperimen yang dilakukannya, **Faraday** menyusun Hukum Faraday. Hukum ini yang menyatakan bahwa *gaya gerak listrik induksi sebanding dengan laju perubahan fluks medan magnet yang terjadi di dalam kumparan.* Pernyataan Hukum Faraday ini dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut.

$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \qquad (6\text{–}1)$$

Keterangan:
ε = ggl induksi (V)
Δt = selang waktu (s)
$\Delta\Phi$ = perubahan fluks magnetik (Wb)
N = jumlah lilitan

Oleh karena $\Phi = BA\cos\theta$, **Persamaan (6–1)** dapat dinyatakan dalam persamaan berikut.

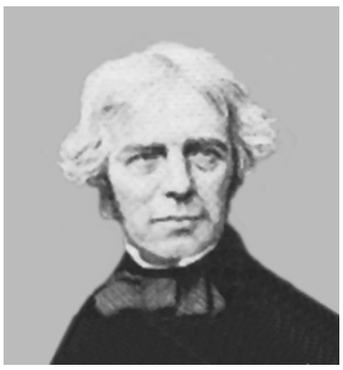
$$\varepsilon = -N\frac{\Delta(BA\cos\theta)}{\Delta t} \qquad (6\text{–}2)$$

Keterangan:
B = kuat medan magnetik (Wb/m^2)
A = luas bidang kumparan (m^2)
θ = sudut antara arah induksi magnetik dan arah normal bidang kumparan

Berdasarkan **Persamaan (6–2)** dapat dipahami bahwa ggl induksi atau arus induksi dapat terjadi akibat:
a. perubahan kuat medan magnetik;
b. perubahan luas bidang kumparan yang ditembus oleh medan magnetik.

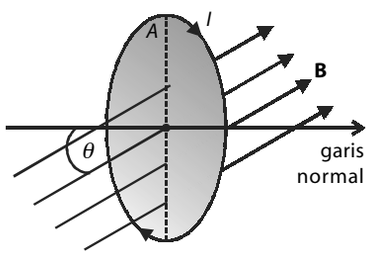
Tokoh

Michael Faraday
(1791–1867)



Sumber: *www.allbiographies.com*

Michael Faraday adalah seorang ahli Fisika, ahli Kimia, dan ahli Filsafat berkebangsaan Inggris, tepatnya lahir di Newington Butts, Surey, pada tahun 1971. Ia bersama-sama dengan Joseph Henry menemukan fenomena induksi elektromagnetik. Penemuan ini merupakan kebalikan dari penemuan Oersted, yaitu dari medan listrik dapat menghasilkan arus listrik.



Gambar 6.2
Garis-garis gaya magnetik yang membentuk sudut θ terhadap garis normal.

Tantangan untuk Anda

Bagaimana pengaruh perubahan lilitan terhadap ggl induksi?

Contoh 6.1

Sebuah magnet digerakkan menjauhi kumparan yang terdiri atas 100 lilitan. Dalam waktu 0,04 s, fluks magnetik yang menembus kumparan berkurang dari 7×10^{-5} Wb menjadi 2×10^{-5} Wb. Berapa ggl yang diinduksikan pada ujung-ujung kumparan?

Jawab:

Diketahui:

$N = 1.000$ lilitan;

$\Delta t = 0{,}04$ s;

$\Delta\Phi = 2 \times 10^{-5}\,\text{Wb} - 7 \times 10^{-5}\,\text{Wb}$

$= -5 \times 10^{-5}\,\text{Wb}.$

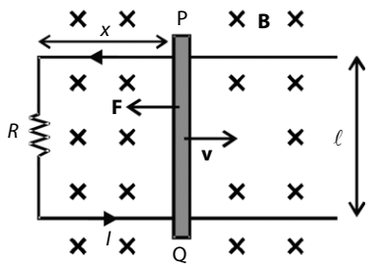
$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

$$= -100\left(\frac{-5\times10^{-5}\,\text{Wb}}{0{,}04\ \text{s}}\right) = 1{,}25\ \text{V}$$

Jadi, ggl yang diinduksikan adalah1,25 V.

3. Ggl Induksi karena Perubahan Luas Bidang Kumparan

Sesuai dengan Hukum Faraday, setiap kali suatu batang konduktor bergerak dalam medan magnetik hingga memotong garis-garis gaya magnetik, akan timbul ggl induksi. Ggl induksi dapat terjadi akibat perubahan luas bidang kumparan yang ditembus oleh medan magnetik.



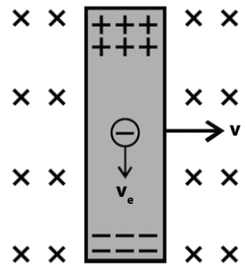
Gambar 6.3
Penghantar PQ digerakkan dengan kecepatan **v** di dalam medan magnet homogen **B**.

Perhatikan **Gambar 6.3**. Medan magnet homogen dengan rapat garis gaya B dan tegak lurus masuk bidang kertas. Jika penghantar PQ digerakkan ke kanan dengan kecepatan v sejauh x, akan terjadi perubahan garis gaya yang dilingkupi oleh batang konduktor PQ dengan rangkaian kawat U. Perubahan luas per satuan waktu akibat pergeseran batang konduktor PQ memenuhi persamaan berikut.

$$\frac{dA}{dt} = \frac{d(\ell x)}{dt} = \ell\frac{dx}{dt} = \ell v$$

Dengan demikian, ggl induksi memenuhi persamaan berikut.

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt} = -N\frac{d(AB)}{dt} = -N\,B\frac{dA}{dt} = -N\,B\,\ell\,v \qquad (6\text{–}3)$$



Gambar 6.4
Gerak elektron dalam batang konduktor bergerak di atas medan magnet.

Tanda negatif menunjukkan arah induksi elektromagnetik berlawanan dengan arah penyebab terbentuknya induksi. Untuk penyederhanaan penulisan, seringkali tanda negatif tidak ditulis. Untuk kumparan yang terdiri atas satu lilitan ($N = 1$), persamaannya menjadi:

$$\varepsilon = B\,\ell\,v \qquad (6\text{–}4)$$

Oleh karena kawat berbentuk U dan batang konduktor PQ membentuk rangkaian tertutup, pada kawat tersebut akan mengalir arus induksi (I).

Arah arus induksi yang diperlihatkan pada **Gambar 6.4** dapat ditentukan dengan menerapkan Hukum Lenz yang menyatakan bahwa jika arah induksi magnet B menuju ke dalam bidang kertas dan arah v

ke kanan, muatan negatif pada batang konduktor PQ akan mendapat gaya ke bawah. Arah arus listrik sesuai dengan arah muatan positif sehingga arah arus induksi dalam batang konduktor adalah dari Q ke P.

Oleh karena arah arus induksi dalam batang konduktor dari Q ke P, sedangkan arah induksi magnetik B ke dalam bidang kertas, akan timbul gaya magnetik F yang arahnya ke kiri. Anda dapat membuktikannya menggunakan kaidah tangan kanan. Besarnya gaya magnetik tersebut memenuhi persamaan

$$F = B\,I\,\ell \qquad (6\text{–}5)$$

Anda perhatikan kembali **Gambar 6.3**. Dalam kawat U mengalir arus listrik (I) akibat adanya beda potensial (ΔV) di antara titik P dan Q. Besarnya beda potensial tersebut sama dengan besarnya ggl induksi pada batang konduktor.

Berdasarkan Hukum Ohm, besarnya kuat arus listrik yang mengalir pada kawat U adalah sebagai berikut.

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{B\,\ell\,v}{R} \qquad (6\text{–}6)$$

Menurut Hukum Kekekalan Energi, energi yang digunakan untuk memindahkan muatan di dalam batang konduktor PQ sama dengan energi yang digunakan untuk memindahkan muatan pada kawat U. Oleh karena itu, kuat arus yang mengalir dalam kawat U sama dengan kuat arus induksi yang mengalir pada batang konduktor PQ. Dengan demikian, **Persamaan (6–6)** dapat disubstitusikan ke dalam **Persamaan (6–5)**, sehingga diperoleh persamaan baru sebagai berikut.

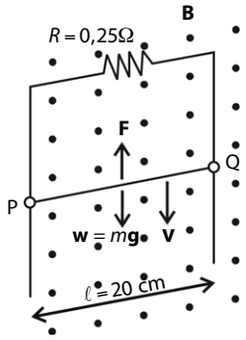
$$F = B\left(\frac{B\,\ell\,v}{R}\right)\ell$$

$$F = \frac{B^2\,\ell^2\,v}{R} \qquad (6\text{–}7)$$

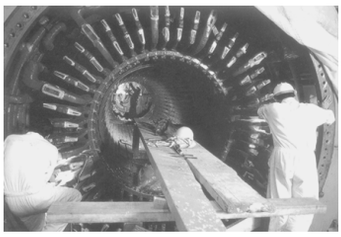
Keterangan:
F = gaya Lorentz (N)
v = kecepatan (m/s)
B = kuat medan magnet (Wb/m^2)
ℓ = panjang penghantar (m)
R = hambatan (Ω)

Contoh 6.2

Kawat penghantar PQ panjangnya 20 cm dan massanya 10 g dapat bergerak vertikal bebas ke bawah pada kawat rangkaian. Di sekitarnya terdapat medan magnet sebesar 0,5 T dengan arah keluar bidang kertas seperti tampak pada gambar.



Informasi untuk Anda



Para teknisi ini sedang memasang generator pada instalasi pembangkit listrik di Meksiko. Bagian yang terlihat di sini adalah stator, yang tidak bergerak. Selanjutnya, ke dalam stator itu dimasukkan rotor. Rotor merupakan sebuah elektromagnetik kuat yang dapat berputar dengan kecepatan tinggi. Akibat perputaran rotor, terjadi perubahan medan magnetik dan membangkitkan arus listrik pada kumparan di dalam stator.

Information for You

The pisture have shown the technician placing generator on electrical instalation in Mexico. You can see a part, called stator. The rotor is put inside it. Rotor is a strong electromagnetic device that can spin with cause the velocity. That spin is what cause the change of magnetic field and generate electrical element on coil inside stator.

Sumber: *The Oxford Children's Book of Science*, 1995

Tantangan untuk Anda

Sebuah penghantar berbentuk U terletak di dalam daerah berinduksi magnetik homogen $B = 4 \times 10^{-3}$ T berarah menembus bidang kertas. Penghantar PQ sepanjang 40 cm menempel pada penghantar U dan digerakkan ke kanan dengan kecepatan tetap $v = 10$ m/s. Hitung ggl induksi antara ujung-ujung PQ.

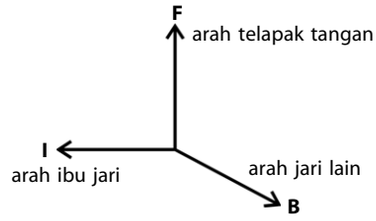
Tentukan:

a. arah arus dalam kawat penghantar PQ;

b. kecepatan konstan kawat penghantar.

Jawab:

a. Gaya berat penghantar PQ sebesar $F = m\,g$ menyebabkan penghantar PQ bergerak dengan kecepatan v ke bawah. Gerak penghantar PQ yang memotong tegak lurus medan magnet B menimbulkan gaya Lorentz F yang arahnya ke atas. Kecepatan konstan penghantar PQ tercapai ketika besar gaya Lorentz sama dengan besar gaya berat penghantar PQ. Sesuai dengan Hukum Lenz bahwa arah arus dapat ditentukan dengan aturan kaidah tangan kanan seperti pada gambar. Arah induksi magnetik ke luar bidang, arah gaya Lorentz ke atas, dan arah arus i pada penghantar ke kiri yaitu dari Q ke P.



b. Kecepatan konstan tercapai ketika gaya Lorentz sama dengan gaya berat penghantar.
Diketahui gaya Lorentz pada **Persamaan (6–11)**,

$$F = \frac{B^2 \ell^2 v}{R}$$ sedangkan gaya $F = mg$ sehingga

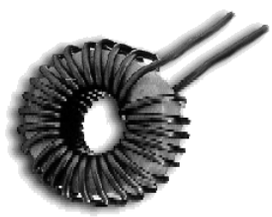
$$\frac{B^2 \ell^2 v}{R} = mg$$

$$v = \frac{mgR}{B^2 l^2}$$

$$v = \frac{(0{,}01\,\text{kg})(10\ \text{m/s}^2)(0{,}25\,\Omega)}{(0{,}5\ \text{Wb/m}^2)(0{,}2\ \text{m})} = 25\ \text{m/s}$$

Jadi, kecepatan konstan kawat adalah 25 m/s.

Informasi untuk Anda



Sumber: *www.linearmagnetics.com*

Induktor adalah sebuah elektromagnet, yaitu sebuah kumparan kawat dengan atau tanpa inti magnetik yang menghasilkan magnetisme jika arus mengalir melewatinya.

Information for You

Inductor is an electromagnet, made of wire coil with or without magnetic core which can produce magnetism when electric current through.

Sumber: *Jendela Iptek*, 1997

4. Induktansi Diri

Jika sebuah kumparan dialiri arus listrik (I) yang besarnya berubah-ubah terhadap waktu, akan timbul fluks magnetik (Φ_m) yang besarnya juga berubah terhadap waktu. Perubahan fluks magnetik sebanding dengan kuat arus. Secara matematis ditulis sebagai berikut.

$$\Phi_m \approx I \ \text{ atau } \ \Phi_m = L\,I \qquad (6\text{–}8a)$$

dengan L merupakan suatu konstanta yang disebut dengan induktansi diri kumparan tersebut. Induktansi diri tegak lurus terhadap bentuk geometrik kumparannya. Satuan induktansi ialah henry (H). Bentuk umum indikator berupa solenoida, secara langsung induktansi diri solenoida ini dapat dihitung seperti berikut ini.

$$L = \frac{\Phi_m}{I} \qquad (6\text{–}8b)$$

Oleh karena fluks magnetik untuk N lilitan pada solenoida adalah $\Phi_m = N\,B\,A = n\,\ell\,BA = \mu_0\,n^2 A\,\ell\,I$ maka induktansi diri solenoida adalah sebagai berikut.

$$L = \mu_0\,n^2 A\,\ell \qquad (6\text{–}9)$$

Persamaan (6–9) berlaku juga untuk induktansi diri pada pusat toroida karena besar induksi magnet di antara keduanya sama, yaitu sebesar $\mu_0\,n\,I$.

Jika penampang solenoida atau toroida diisi oleh bahan yang memiliki permeabilitas relatif μ_r dimana permeabilitas bahan adalah

$$\mu = \mu_r \mu_0 \qquad (6\text{–}10)$$

Induktansi diri solenoida dan toroida dengan bahan tersebut adalah

$$L = \mu\,n^2 A\ell = \mu_r L_0 \qquad (6\text{–}11)$$

Keterangan:
L_b = induktansi diri solenoida atau toroida dengan inti bahan (H)
L_0 = induktansi diri solenoida atau toroida tanpa inti (H)

Contoh 6.3

Toroida dengan luas penampang 4 cm^2 dan panjangnya 40 cm memiliki 400 lilitan. Tentukanlah induktansi diri toroida tersebut.

Jawab:
Diketahui:
$A = 4\text{ cm}^2 = 4 \times 10^{-4}\text{ m}^2$;
$N = 400$;
$\ell = 40\text{ cm} = 0{,}4\text{ m}$;
$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{ Wb/Am}$.
sehingga diperoleh:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} = \frac{\left(4\pi \times 10^{-7}\text{ Wb/Am}\right)(400)^2\left(4 \times 10^{-4}\text{ m}^2\right)}{0{,}4\text{ m}}$$

$$L = 64\,\pi \times 10^{-6}\text{ H} \Rightarrow = 64\pi\mu\text{ H}$$

Jadi, induktansi diri toroida adalah $64\pi\mu$ H.

Suatu rangkaian yang terdiri atas sebuah kumparan (induktor) L, sebuah lampu P, dan sumber tegangan ε yang dilengkapi dengan sebuah saklar S, tampak pada **Gambar 6.5**. Ketika saklar dihubungkan, lampu tidak segera menyala maksimum, tetapi ada jeda waktu sesaat. Pada saat arus diputuskan pada saklar penghubung, lampu tidak segera padam, tetapi ada jeda waktu sesaat. Perhatikan **Gambar 6.5(b)**. Peristiwa ini menunjukkan timbulnya arus induksi yang disebabkan oleh adanya perubahan fluks magnetik pada induktor L.

Perubahan arus pada sebuah kumparan dapat menimbulkan ggl induksi yang besarnya berbanding lurus dengan cepatnya perubahan kuat arusnya. Secara matematis, pernyataan yang dikemukakan pertama kali oleh **Joseph Henry** ini dituliskan sebagai berikut.

$$\varepsilon = -L\frac{dI}{dt} \qquad (6\text{–}12)$$

Pembahasan Soal

Kuat arus listrik dalam suatu rangkaian tiba-tiba turun dari 10 A menjadi 2 A dalam waktu 0,1 s. Selama peristiwa ini terjadi, timbul ggl induksi sebesar 32 V dalam rangkaian. Induktansi rangkaian adalah
a. 0,32 H
b. 0,40 H
c. 2,5 H
d. 32 H
e. 40 H

UMPTN 1993

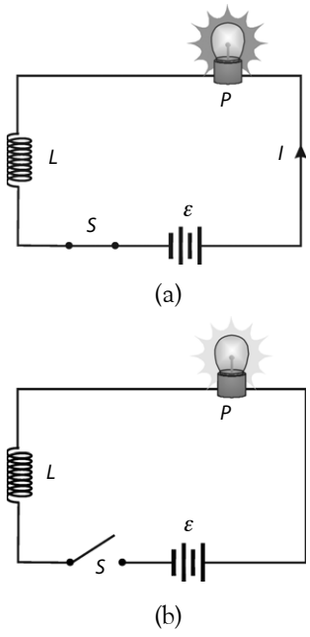
Pembahasan:
Diketahui:
$\Delta I = 10\text{ A} - 2\text{ A} = 8\text{ A}$
$\varepsilon_{ind} = 32\text{ V}$

$$\varepsilon_{ind} = L\frac{dI}{d\ell}$$

$$32\text{ V} = \frac{3{,}2\text{ V}_s}{8\text{ A}}$$

$$L = \frac{3{,}2\text{ V}_s}{8\text{ A}} = 0{,}4\text{ H}$$

Jawaban: e



Gambar 6.5
Sebuah rangkaian tertutup (a) saklar s ditutup, lampu menyala dan (b) saklar s dibuka, lampu masih menyala beberapa saat kemudian padam.

Tanda negatif merupakan penyesuaian dengan Hukum Lenz. Jika laju perubahan kuat arus $\left(\frac{dI}{dt}\right)$ konstan maka **Persamaan (6–11)** dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\varepsilon = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} = -L\left[\frac{I_2 - I_1}{t_2 - t_1}\right] \qquad (6\text{–}13)$$

Keterangan:
I_1 = kuat arus listrik pada keadaan awal (A)
I_2 = kuat arus listrik pada keadaan akhir (A)
$\Delta t = t_2 - t_1$ = selang waktu perubahan kuat arus listrik (s)

Contoh 6.4

Sebuah kumparan dengan induktansi diri 0,3 H dialiri arus sebagai fungsi waktu $I = 10 - 4t^2$, I dalam ampere dan t dalam sekon. Tentukan ggl induksi diri yang terjadi saat $t = 2$ s.

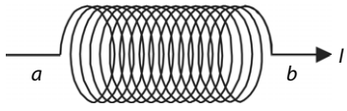
Jawab:
Diketahui:
$L = 0{,}3$ H
$I = 10 - 4t^2$
Dengan menggunakan **Persamaan (6–12)** diperoleh

$$\begin{aligned}\varepsilon &= -L\frac{dI}{dt} = -L(10 - 4t^2)\\ &= (-0{,}3\text{ H})(-8t)\\ &= (-0{,}3)(-8)(2)\\ &= 4{,}8\text{ V}\end{aligned}$$

Jadi, ggl induksi diri pada saat $t = 25$ adalah 4,8 V.

5. Energi yang Tersimpan dalam Induktor

Induktor mampu menyimpan energi. Energi tersebut tersimpan dalam bentuk medan magnet. Perhatikan **Gambar 6.6**. Jika sebuah induktor L dialiri arus listrik I yang selalu berubah terhadap waktu, besarnya tegangan antara titik a dan b adalah



Gambar 6.6
Sebuah kawat induktor yang dialiri arus listrik.

$$V_{ab} = L\frac{dI}{dt} \qquad (6\text{–}14)$$

sehingga besarnya daya yang diberikan pada induktor adalah:

$$P = IV_{ab} = I\left(L\frac{dI}{dt}\right) = LI\frac{dI}{dt} \qquad (6\text{–}15)$$

Energi yang diberikan pada induktor diperoleh dengan mengintegrasikan daya pada induktor sehingga diperoleh persamaan

$$W = \int P\,dt$$

$$W = \int L\,I\frac{dI}{dt}dt$$

$$W = L\int I\, dI$$

$$W = \frac{1}{2} L I^2 \qquad (6\text{–}16)$$

6. Rapat Energi dalam Bentuk Medan Magnetik

Telah diketahui besarnya induksi magnetik di pusat solenoida memenuhi persamaan berikut.

$$B = \mu_0 n I \quad \text{atau} \quad I = \frac{B}{\mu_0 n}$$

Adapun induktansi diri pada solenoida adalah $L = \mu_0 n^2 A \ell$. Jika nilai I dan nilai induktansi L Anda substitusikan ke dalam **Persamaan (6–16)** akan diperoleh persamaan

$$W = \frac{1}{2}\left(\mu_0 n^2 A \ell\right)\left(\frac{B}{\mu_0 n}\right)^2 = \frac{B^2 V}{2\mu_0} \qquad (6\text{–}17)$$

Dengan volume solenoida/toroida adalah $V = A\ell$. Jika rapat energi atau energi per satuan volume kita diberi notasi U, berlaku hubungan:

$$U = \frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0} \qquad (6\text{–}18)$$

Contoh 6.5

Sebuah solenoida memiliki jumlah lilitan sebanyak 100 buah, panjang dan luas penampang solenoida adalah 75 cm dan 25 cm^2. Hitunglah:

a. induktansi diri solenoida;
b. energi yang dihasilkan pada solenoida jika arus listrik yang mengalir sebesar 10 A;
c. besar ggl induksi diri yang terjadi jika dalam waktu 5 s kuat arus berubah menjadi 2,5 A.

Jawab:

Diketahui:

$N = 100$ lilitan;
$A = 25\ \text{cm}^2 = 25\times10^{-4}\ \text{m}^2$;
$\ell = 75\ \text{cm} = 75\times10^{-2}\ \text{m}$;
$I = 10\ \text{A}$.

a. Induktansi diri solenoida adalah $L = \dfrac{\mu_0 N^2 A}{\ell}$

$$L = \frac{(4\pi\times10^{-7}\ \text{Wb/Am})(100)^2\,(25\times10^{-4}\ \text{m}^2)}{75\times10^{-2}\ \text{m}} = \frac{4}{3}\pi\times10^{-5}\ \text{H}$$

b. Energi yang dihasilkan pada saat $I = 10$ A adalah

$$W = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}\left(\frac{4}{3}\pi\times10^{-5}\ \text{H}\right)(10\text{A})^2 = \frac{2}{3}\pi\times10^{-3}\ \text{J}$$

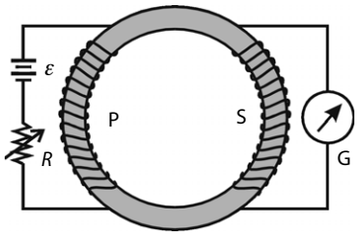
c. Besar GGL induksi diri jika arus berubah menjadi 2,5 A adalah

$$\varepsilon = -L\frac{dI}{dt} = \left(-\frac{4}{3}\pi\times10^{-5}\ \text{H}\right)\left(\frac{10\text{A} - 2{,}5\text{A}}{5\ \text{s}}\right) = -2\pi\times10^{-5}\ \text{V}$$

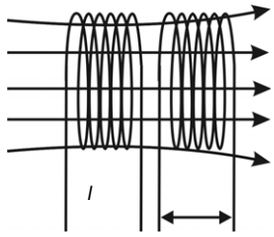


Tantangan untuk Anda

Sebuah kumparan (solenoida) memiliki induktansi 500 mH. Hitunglah besar induksi ggl yang dibangkitkan dalam kumparan itu jika ada perubahan arus listrik dari 100 mA menjadi 40 mA dalam waktu 0,01 s secara beraturan.



Gambar 6.7
Induktor silang antara dua buah kumparan.



Gambar 6.8
Perubahan arus pada kumparan 1 akan memengaruhi arus pada kumparan 2.

8. Induktansi Silang

Perhatikan **Gambar 6.7**. Tampak dua buah kumparan, yaitu kumparan primer P dan kumparan sekunder S yang berdekatan. Kumparan primer P dihubungkan dengan sumber tegangan ε dan hambatan variabel R. Kumparan sekunder S dihubungkan dengan sebuah galvanometer (G). Jika pada kumparan primer terjadi perubahan kuat arus, dengan mengubah-ubah hambatan R, akan terjadi perubahan fluks magnetik pada kumparan primer. Dengan demikian, fluks magnetik yang dilingkupi kumparan sekunder pun akan berubah pula. Perubahan fluks magnetik tersebut akan menimbulkan ggl pada kumparan sekunder.

Ggl yang timbul pada kumparan primer maupun kumparan sekunder disebut *induktansi silang* atau *induktansi timbal balik*. Besarnya ggl induksi yang timbul pada kumparan sekunder karena pengaruh perubahan fluks magnetik dalam waktu dt memenuhi persamaan:

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi_1}{dt} = -M\frac{dI_1}{dt} \qquad (6\text{–}19)$$

$$\varepsilon_1 = -N_1 \frac{d\Phi_2}{dt} = -M\frac{dI_2}{dt} \qquad (6\text{–}20)$$

Jika **Persamaan (6–19)** ditinjau lebih lanjut diperoleh

$$N_2 \frac{d\Phi_1}{dt} = M\frac{dI_1}{dt} \text{ atau } N_2 d\Phi_1 = M dI_1$$

Dengan metode integrasi, akan diperoleh:

$$N_2 \int d\Phi_1 = M \int dI_1 \Rightarrow N_2\Phi_1 = MI_1$$

$$M = \frac{N_2\Phi_1}{I_1} \qquad (6\text{–}21)$$

Dengan menggunakan penalaran yang sama, maka dari **Persamaan (6–21)** akan diperoleh:

$$M = \frac{N_1\Phi_2}{I_2} \qquad (6\text{–}22)$$

Besar fluks magnetik Φ_1 yang ditimbulkan oleh arus listrik I_1 dengan jumlah lilitan N_1 adalah $\Phi_1 = AB_1 = A\frac{\mu_0 N_1 I_1}{\ell}$. Jika nilai Φ_1 disubstitusikan ke dalam **Persamaan (6–21)** diperoleh persamaan berikut.

$$M = \frac{\mu_0\, N_2\, N_1\, A}{\ell} \qquad (6\text{–}23)$$

Keterangan:
I_1 = kuat arus listrik kumparan primer (A)
M = induktansi silang (H)
N_2 = jumlah lilitan kumparan sekunder
N_1 = jumlah lilitan kumparan primer
Φ_2 = fluks magnetik yang dilingkupi oleh kumparan sekunder yang ditimbulkan oleh kumparan primer (Wb)

Kata Kunci

- gaya gelak listrik (ggl)
- induksi elektromagnetik
- Hukum Faraday
- fluks medan magnetik
- Hukum Lenz
- gaya Lorentz
- ggl induksi diri
- kumparan primer
- kumparan sekunder
- induktansi silang

Contoh 6.6

Sebuah solenoida (kumparan 1) memiliki panjang $\ell = 80$ cm dengan luas penampang $A = 4 \times 10^{-3}$ m^2 dan banyak lilitan $N_1 = 2.000$ lilitan. Di sekitar pusat solenoida, dililitkan kumparan 2 dengan banyak lilitan $N_2 = 500$ lilitan. Tentukan:

a. induktansi silang kedua kumparan;
b. ggl yang timbul pada kumparan 2 jika pada kumparan 1 mengalir arus sebesar 2 A yang berbalik arah dalam waktu 0,4 s.

Jawab:

a. Dengan menggunakan **Persamaan (6–23)** besar induktansi silang dapat ditentukan sebagai berikut.

$$M = \frac{\mu_0 N_2 N_1 A}{\ell} = \frac{\left(4\pi \times 10^{-7}\ \text{Wb/Am}\right)(2.000)(500)\left(4 \times 10^{-3}\ \text{m}^2\right)}{0{,}8\ \text{m}}$$
$$= 2 \times 10^{-2}\ \text{H}$$

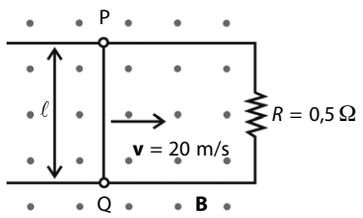
b. Pada kumparan 1, untuk selang waktu $t = 0{,}4$ s, kuat arus 2A berbalik arah, sehingga $\Delta i = (-2\text{A}) + (-2\text{A}) = -4$ A. Besar ggl induksi pada kumparan 2 dapat diperoleh sebagai berikut.

$$\varepsilon_2 = -M\frac{\Delta I}{\Delta t}$$
$$= \frac{(-2\pi \times 10^{-3}\ \text{H})(-4\ \text{A})}{0{,}4\ \text{s}} = 2\pi \times 10^{-2}\ \text{V}$$

Tes Kompetensi Subbab A

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Jika magnet permanen digerakkan memasuki kumparan kawat yang terpasang sebuah amperemeter (alat ukur arus), jarum amperemeter akan menyimpang dari kedudukan setimbangnya. Besaran apakah yang menyebabkan timbulnya penyimpangan tersebut? Apakah yang terjadi pada jarum amperemeter jika:
 a. batang magnet diam dalam kumparan;
 b. batang magnet digerakkan lebih cepat;
 c. batang magnet digerakkan keluar dari kumparan.
2. Fluks magnetik yang memotong suatu kumparan berkurang dari 9 Wb menjadi 3 Wb dalam waktu 3 s. Jika kumparan terdiri atas 5 lilitan, tentukan ggl yang dihasilkan.
3. Pada sebuah induktor dengan 50 lilitan mengalir arus listrik yang berubah terhadap waktu, yaitu 0,05 A/s. Dalam waktu yang sama, menimbulkan perubahan fluks magnet yang dilingkupinya sebesar 0,01 Wb. Tentukan:
 a. induksi diri kumparan;
 b. ggl induksi di ujung-ujung kumparan.
4. Sepotong kawat bergerak memotong medan magnetik homogen yang besarnya 20 T dan membentuk sudut 60°. Jika luas fluks yang terpotong 0,5 m^2 dalam waktu 0,5 s, tentukan ggl induksi yang timbul.
5. Kawat PQ sepanjang 20 cm digerakkan ke kanan dengan kecepatan 20 m/s dan memotong tegak lurus induksi magnetik $B = 5 \times 10^{-2}$ T seperti pada gambar. Tentukan besar gaya Lorentz pada kawat PQ dan arah arusnya.



6. Dalam sebuah kumparan terdapat perubahan kuat arus sebesar 10 A yang menimbulkan perubahan fluks magnetik 25 Wb pada kumparan kedua yang terletak di luar kumparan pertama. Tentukan induktansi silang kedua kumparan jika kumparan kedua memiliki 1.000 lilitan.

B. Aplikasi Induksi Elektromagnetik Faraday

Aplikasi induksi elektromagnetik Faraday dalam kehidupan sehari-hari antara lain sebagai berikut.

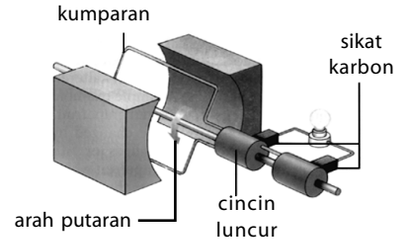
1. Generator

Pernahkah Anda berkunjung ke tempat Pembangkit Listrik Tenaga Air yang ada di Jatiluhur, Jawa Barat? Di sana terdapat alat listrik yang dinamakan *generator*. Generator adalah alat yang berfungsi mengubah energi kinetik menjadi energi listrik. Generator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Terdapat dua jenis generator, yaitu generator arus bolak-balik dan generator arus searah.

a. Generator Arus Bolak-Balik

Gambar 6.9 menunjukkan skema generator arus bolak-balik. Cara kerja generator tersebut adalah sebagai berikut.

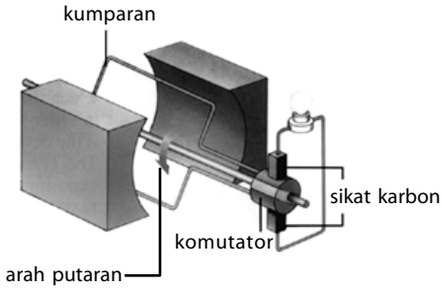
1) Kumparan yang diletakkan dalam medan magnetik diputar sehingga mengalami perubahan jumlah garis gaya magnetik. Akibatnya, terjadi ggl induksi yang mampu menghasilkan arus listrik. Arus listrik yang dihasilkannya berupa arus bolak-balik (AC atau *Alternating Current*) karena setiap karbon akan mendapatkan polaritas ggl induksi yang berubah-ubah (kutub positif dan kutub negatif secara bergantian).
2) Untuk menyalurkan arus listrik yang diperoleh, kedua ujung kumparan dipasangi cincin yang terpisah dan ditempelkan pada sikat karbon yang dihubungkan dengan kabel penyalur.



Gambar 6.9
Skema generator arus bolak-balik

b. Generator Arus Searah

Pada dasarnya, prinsip kerja generator arus searah sama dengan prinsip kerja generator arus bolak-balik. Perbedaannya, pada generator arus searah dipasang *komutator* berupa sebuah cincin belah. Fungsi komutator ini mengatur agar setiap sikat karbon selalu mendapatkan polaritas ggl induksi yang tetap (sikat pertama positif dan sikat lainnya negatif).

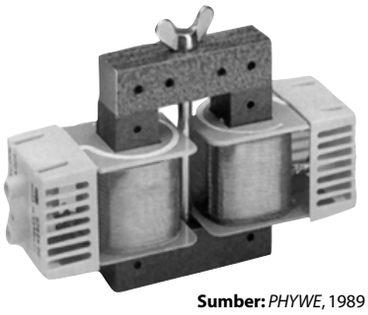


Gambar 6.10
Skema generator arus searah

2. Transformator (Trafo)

Transformator adalah alat yang berfungsi mengubah (menaikkan atau menurunkan) tegangan listrik AC. Oleh karena itu, transformator dibagi menjadi dua jenis, yaitu transformator *step-up* dan transformator *step-down*.

Transformator terdiri atas kumparan primer, kumparan sekunder, dan inti besi. Contoh transformator ditunjukkan pada **Gambar 6.11**.

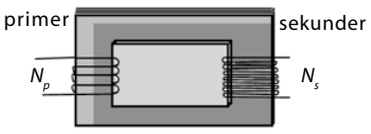


Sumber: *PHYWE*, 1989

Gambar 6.11
Transformator

a. Transformator *Step-up*

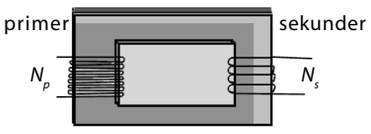
Transformator *step-up* berfungsi menaikkan tegangan listrik AC. Bagan sederhana sebuah transformator *step-up*, ditunjukkan pada **Gambar 6.12**. Pada transformator step-up jumlah lilitan sekunder lebih banyak daripada jumlah lilitan primer ($N_s > N_p$).



Gambar 6.12
Bagan transformator *step-up*

b. Transformator *Step-down*

Transformator *step-down* berfungsi menurunkan tegangan listrik AC. Bagan sederhana sebuah transformator *step-down* ditunjukkan pada **Gambar 6.13**. Pada transformator *step-down*, jumlah lilitan primer lebih banyak daripada jumlah lilitan sekunder ($N_p > N_s$).



Gambar 6.13
Bagan transformator *step-down*

Prinsip kerja transformator adalah sebagai berikut.

1) Kumparan primer dihubungkan dengan tegangan masukan berupa arus bolak-balik (besar dan arahnya selalu berubah-ubah).
2) Oleh karena arus yang berubah-ubah, pada inti besi terjadi perubahan jumlah garis gaya magnetik secara terus-menerus. Akibatnya, pada kumparan sekunder terjadi ggl induksi dan arus induksi sebagai keluaran (*output*) dari transformator.

Perbandingan antara tegangan primer (V_p) dan tegangan sekunder (V_s) pada transformator sama dengan perbandingan antara jumlah lilitan primer (N_p) dan lilitan sekunder (N_s). Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \qquad (6\text{–}24)$$

Keterangan:
V_p = tegangan primer (V)
N_p = jumlah lilitan primer
V_s = tegangan sekunder (V)
N_s = jumlah lilitan sekunder

Jika pada transformator dianggap tidak ada energi listrik yang berubah menjadi energi bentuk lain (trafo ideal), berlaku hubungan sebagai berikut.

daya primer = daya sekunder

$$P_p = P_s \text{ atau } V_p I_p = V_s I_s \qquad (6\text{–}25)$$

Keterangan:
P_p = daya primer (W)
P_s = daya sekunder (W)
I_p = arus primer (A)
I_s = arus sekunder (A)

Aktivitas Fisika 6.2

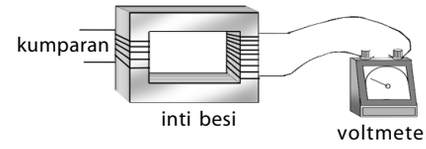
Membuat Transformator

Tujuan Percobaan

Membuat transformator *step-up*.

Alat-Alat Percobaan

1. Kawat tembaga kira-kira 1 m
2. Sumber tegangan 12 V (AC)



Langkah-Langkah Percobaan

1. Susunlah peralatan seperti gambar berikut.
2. Lilitkan 10 lilitan kawat pada bagian kiri inti besi, sebagai kumparan primer. Kemudian, sebanyak 20 lilitan pada bagian karena inti besi yang lain, sebagai kumparan sekunder. Hubungkan dengan sumber tegangan.
3. Catat besar tegangan yang terbaca pada voltmeter.
4. Teruskan menambah 10 lilitan pada kumparan sekunder hingga menjadi 50 lilitan. Amati dan catat besar tegangan yang terbaca pada voltmeter.
5. Masukkan data hasil pengamatan Anda pada tabel. Kemudian, buatlah grafik tegangan sekunder terhadap jumlah lilitan sekunder.

Data Percobaan

No	Jumlah Lilitan Sekunder	Besar Tegangan Sekunder
1.	20	
2.	30	
3.	40	
4.	50	

6. Berikan kesimpulan Anda dari kegiatan ini.

Tantangan untuk Anda

Anda memiliki *walkman* yang menggunakan baterai 3 V. Bagaimana caranya agar *walkman* tersebut dapat menggunakan listrik dari PLN yang besarnya 220 V?

Contoh 6.7

Sebuah trafo step-down akan digunakan untuk menyalakan radio 24 V dari sumber PLN 220 V. Tentukan:

a. perbandingan lilitan primer dan sekunder trafo tersebut;
b. jumlah lilitan primer jika lilitan sekundernya 100 lilitan;
c. arus yang digunakan radio jika di kumparan primer terdapat arus sebesar 0,4 A.

Jawab:

Diketahui :

$V_p = 220$ V; $N_s = 100$ lilitan; $V_s = 22$ V; $I_p = 0{,}4$ A.

a. Perbandingan tegangan sebanding dengan perbandingan jumlah lilitan.

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \rightarrow \frac{220\text{ V}}{22\text{ V}} = \frac{N_p}{N_s}$$

Jadi, perbandingan $N_p : N_s = 10:1$

b. Berdasarkan hasil perhitungan bagian *a* maka:

$$\frac{N_p}{100} = \frac{10}{1} \rightarrow N_p = 1.000$$

Jadi, jumlah lilitan primer 1.000 lilitan.

c. Untuk menghitung arus listrik dapat digunakan persamaan

$P_p = P_s$ atau $V_p I_p = V_s I_s$

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{V_s}{V_p} \rightarrow \frac{0{,}4\text{ A}}{I_s} = \frac{22\text{ V}}{220\text{ V}} \rightarrow I_s = 4\text{ A}$$

Jadi, arus yang digunakan radio adalah 4 A.

Pada kenyataannya tidak ada transformator yang ideal. Sebagian energi listrik berubah menjadi bentuk energi lain dalam transformator, misalnya energi panas. Jadi, untuk transformator tidak ideal selalu berlaku daya sekunder lebih kecil daripada daya primer ($P_s < P_p$) sehingga efisiensinya lebih kecil dari 100%.

Efisiensi sebuah transformator didefinisikan sebagai hasil bagi daya listrik sekunder dengan daya listrik primer. Efisiensi transformator dinyatakan dalam persen, secara matematis ditulis

$$\eta = \frac{P_s}{P_p} \times 100\% \qquad (6\text{–}26)$$

Keterangan:
η = efisiensi transformator
P_s = daya listrik sekunder
P_p = daya listrik primer

Ingatlah

Tidak ada transformator yang efisiensinya 100% karena sebagian energi listrik berubah menjadi bentuk energi lain.

Contoh 6.8

Sebuah transformator dalam sebuah radio transistor dapat mengubah tegangan dari 220 V menjadi 9 V. Jumlah lilitan sekundernya 90 lilitan, ternyata kuat arus yang mengalir pada radio 0,4 A. Jika efisiensi transformator tersebut 80%, tentukan:
a. kuat arus listrik pada kumparan primer;
b. daya primer dan daya sekunder.

Jawab:
Diketahui :
$V_p = 220$ V; $N_s = 90$ lilitan; $V_s = 9$ V; $I_s = 0{,}4$ A.

a. Transformator tidak bersifat ideal, maka berlaku

$$\eta = \frac{P_s}{P_p} \times 100\% = \frac{V_s I_s}{V_p I_p} \times 100\%$$

$$80\% = \frac{(9\text{ V})(0{,}4\text{ A})}{(220\text{ V})(I_p)} \times 100\% \rightarrow I_p = 0{,}02\text{ A}$$

Jadi, kuat arus listrik pada kumparan primer adalah 0,02 A.

b. Untuk menghitung daya pada setiap kumparan dapat digunakan persamaan

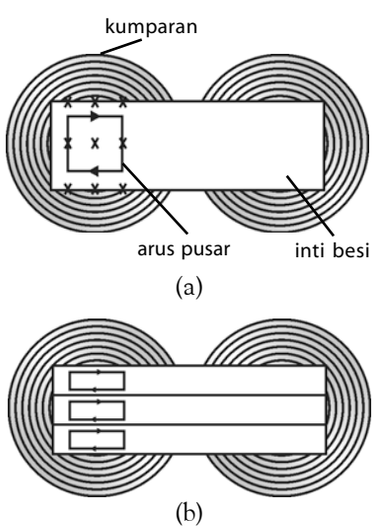
$P_p = V_p I_p = (220\text{ V})(0{,}02\text{ A}) = 4{,}4\text{ W}$
Jadi, daya primernya adalah 4,4 W.
$P_s = V_s I_s = (9\text{ V})(0{,}4\text{ A}) = 3{,}6\text{ W}$
Jadi, daya sekundernya adalah 3,6 W.

c. Arus Pusar pada Transformator

Perhatikan batang konduktor antara dua muka kutub elektromagnetik seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 6.14(a)**. Jika medan magnetik B antara muka kutub itu berubah terhadap waktu, fluks yang melalui sembarang simpal tertutup dalam batang akan berubah juga sehingga timbul arus. Arus ini dinamakan dengan *arus eddy* atau arus pusar.

Arus pusar yang terjadi pada inti trafo merugikan sebab trafo kehilangan energi atau dayanya menjadi panas. Jika panas ini cukup tinggi, trafo dapat terbakar sehingga rusak.

Untuk mencegah kerugian daya, batang konduktor transformator dibuat berlapis-lapis, seperti pada **Gambar 6.14(b)**. Di antara lapisan pelat logam diberi isolasi (*laker*) sehingga lingkaran arus pusar menjadi



Gambar 6.14
(a) Trafo dengan inti besi.
(b) Trafo dengan inti besi berupa lempengan yang terpisahkan oleh laker.

Kata Kunci

- generator
- *Alternating Current*
- komutator
- *transformator/trafo*
- *transformator step-up*
- *transformator step-down*
- efisiensi transformator
- arus pusar (*arus eddy*)

kecil. Dengan cara seperti ini, kerugian daya akibat arus pusar dapat dikurangi.

Tidak semua arus pusar bersifat merugikan, pada beberapa peralatan yang menggunakan prinsip induksi elektromagnetik, arus pusar yang timbul dapat menguntungkan, seperti pada rem magnetik, tungku listrik, dan setrika listrik.

3. Transmisi Daya Listrik Jarak Jauh

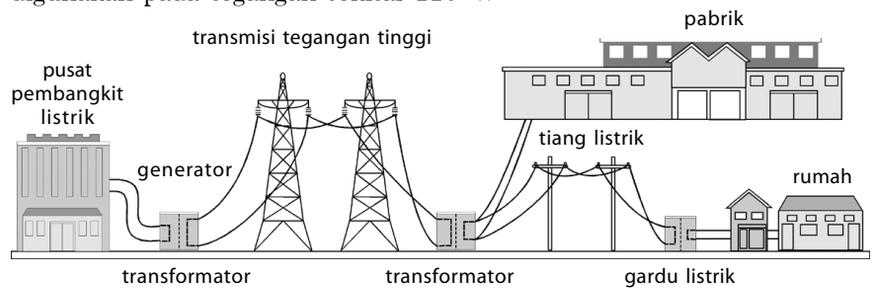
Transmisi daya listrik jarak jauh merupakan proses penyaluran daya listrik ke tempat tujuan tertentu yang jaraknya jauh dari pusat pembangkit listrik. Listrik yang sampai di rumah-rumah penduduk adalah hasil transmisi daya listrik jarak jauh.

Ada dua cara mentransmisikan daya listrik jarak jauh, yaitu:

1. dengan kuat arus listrik besar yang dihasilkan oleh generator;
2. dengan tegangan yang lebih tinggi dari tegangan yang dihasilkan oleh generator.

Pada umumnya, transmisi daya listrik jarak jauh menggunakan tegangan tinggi. Keuntungan yang diperoleh dengan menggunakan transmisi tegangan tinggi adalah arus listrik yang mengalir melalui kawat relatif kecil sehingga ukuran kawat transmisi yang kecil juga dapat memberikan anggaran biaya jauh lebih ekonomis, dan daya listrik yang hilang sepanjang kawat transmisi jauh lebih kecil sehingga diperoleh efisiensi daya listrik yang besar.

Pada proses transmisi daya listrik jarak jauh digunakan transformator step-up yang terdapat di pusat pembangkit yang menaikkan tegangan hingga mencapai sekitar 150.000 V. Kemudian, daya listrik ditransmisikan ke kota-kota tujuan. Di kota-kota tujuan, digunakan transformator step-down yang dipasang di gardu-gardu listrik sehingga tegangan listrik siap digunakan pada tegangan sekitar 220 V.



Gambar 6.15
Bagan transmisi daya listrik jarak jauh

Sumber: *Jendela IPTEK*, 1995

Contoh 6.9

Sebuah generator yang dapat menghasilkan daya listrik 20 MW ditransmisikan melalui penghantar dengan hambatan $R = 20\,\Omega$. Hitunglah persentase daya yang hilang menjadi kalor jika:

a. tegangan yang digunakan transmisi 40 kV;
b. tegangan dinaikkan oleh trafo step up menjadi 400 kV.

Jawab:

Diketahui: $P = 20$ MW; $R = 20\,\Omega$

a. Persentase daya listrik yang hilang jika digunakan tegangan transmisi 40 kV dapat dihitung sebagai berikut.

$$I_{\text{transmisi}} = \frac{P}{V} = \frac{20 \times 10^6 \text{ W}}{40 \times 10^3 \text{ V}} = 500 \text{ A}$$

Daya yang hilang menjadi kalor (P_{hilang}) adalah

$P_{hilang} = I^2 R = (500\ \text{A})^2\ (20\ \Omega) = 5\ \text{MW}$

Persentase $P_{hilang} = \dfrac{5\ \text{MW}}{20\ \text{MW}} \times 100\% = 25\%$

b. Daya yang hilang jika tegangan transmisi dinaikkan melalui trafo menjadi 400 kV adalah

$I_{transmisi} = \dfrac{P}{V} = \dfrac{20 \times 10^6\ \text{W}}{400 \times 10^3\ \text{V}} = 50\ \text{A}$

Daya yang hilang menjadi kalor (P_{hilang}) adalah

$P_{hilang} = I^2 R = (50\ \text{A})^2\ (20\Omega) = 50\ \text{W}$

Jadi, persentase $P_{hilang} = \dfrac{P}{V} = \dfrac{50\ \text{kW}}{20\ \text{MW}} \times 100\% = 0,25\%$.

Tes Kompetensi Subbab B

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Sebuah transformator step-up memiliki 80 lilitan pada kumparan primernya dan 1.000 lilitan pada kumparan sekundernya. Kumparan primer diberi arus bolak-balik bertegangan 120 V.
 a. Berapa tegangan kumparan sekunder?
 b. Jika arus dalam kumparan sekunder 2,0 A, berapa arus yang mengalir dalam kumparan primer?
 c. Berapa daya masukan dan daya keluaran transformator?
2. Sebuah transformator dihubungkan dengan sumber tegangan PLN 220 V dan kuat arusnya 0,1 A. Ternyata tegangan keluarannya sebesar 22 V dan kuat arusnya 0,6 A.
 Hitung:
 a. efisiensi transformator;
 b. perbandingan jumlah lilitan primer dan sekunder.
3. Sebuah transformator yang dipasang pada radio memiliki spesifikasi 12 V, terminal primernya dihubungkan dengan sumber PLN 220 V. Jika jumlah lilitan sekunder transformator tersebut 360 lilitan dan arus yang mengalir dalam radio 0,8 A, tentukan
 a. jumlah lilitan primer;
 b. kuat arus pada kumparan primer;
 c. daya primer dan daya sekunder jika efisiensi transformator 60%.

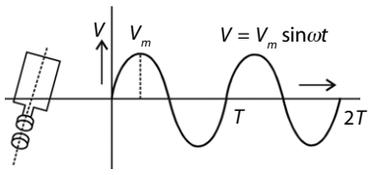
C. Arus dan Tegangan Listrik Bolak-balik

Arus dan tegangan listrik bolak-balik memiliki nilai yang selalu berubah-ubah terhadap waktu secara periodik, baik besar maupun arahnya. Besaran arus dan tegangan bolak-balik, dilambangkan dengan —◎—. Dewasa ini, hampir semua peralatan rumah tangga dioperasikan dengan energi listrik arus bolak-balik. Seperti Anda ketahui, perbedaan mendasar antara arus bolak-balik dan arus searah adalah polaritasnya.

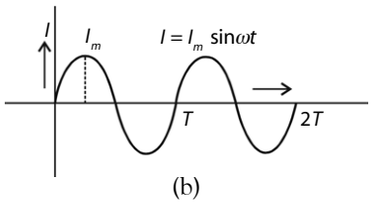
Untuk mengetahui polaritas arus searah yang selalu tetap dan arus bolak-balik yang selalu berubah, dapat digunakan osiloskop (*Cathode Ray Osciloscope*). Melalui alat ini, dapat juga diamati nilai frekuensi dan perubahan tegangan pada setiap saat dalam bentuk grafik. Adapun untuk mengukur nilai tegangan efektif dan kuat arus listrik efektif dapat digunakan voltmeter AC dan amperemeter AC.

1. Sumber Tegangan Bolak-Balik (AC)

Bentuk tegangan arus AC yang terbaca pada monitor osiloskop berubah secara periodik menurut fungsi sinus. Salah satu sumber AC, yaitu generator arus AC. Dalam generator ada kumparan yang dapat berputar bebas dalam medan magnet homogen.



(a)



(b)

Gambar 6.16
Grafik tegangan dan arus listrik bolak-balik terhadap waktu.

Perhatikan **Gambar 6.16**. Osilasi gaya gerak listrik dan arus bolak-balik dihasilkan dari sebuah kumparan yang berputar dengan laju tetap. Pada gambar grafik tersebut, puncak dan simpul gelombang menunjukkan kedudukan kumparan terhadap besar sudut yang ditempuhnya.

Besar ggl yang dihasilkan dari sebuah generator yang berputar memenuhi persamaan berikut.

$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ atau untuk } \Delta t \to 0,\ \varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt}$$

karena $\Phi = B\,A\cos\theta$ maka

$$\varepsilon = -N\frac{d\,(BA\cos\theta)}{dt} \text{ atau } \varepsilon = -N\frac{d\,(BA\cos\omega\,t)}{dt} \qquad (6\text{–}27)$$

Jika kita turunkan **Persamaan (6–27)** didapat

$$\varepsilon = NBA\omega\sin\omega t \qquad (6\text{–}28)$$

Atau dapat juga dituliskan dengan

$$\varepsilon = \varepsilon_{maks}\sin\omega t \qquad (6\text{–}29a)$$

Karena ggl induksi sama dengan beda tegangan di antara dua kutub ggl induksi maka dapat ditulis

$$V = V_{maks}\sin\omega\,t \qquad (6\text{–}29b)$$

Keterangan:

ε_{maks} = gaya gerak listrik maksimum (volt)
= $N\,B\,A\,\omega$ (volt)
V_{maks} = tegangan maksimum (volt)
Φ = fluks magnetik (Wb)
N = jumlah lilitan kumparan
A = luas bidang kumparan (m^2)
B = besarnya induksi magnetik (T)
ω = frekuensi sudut putaran kumparan (rad/s) = $\frac{\omega}{t}$

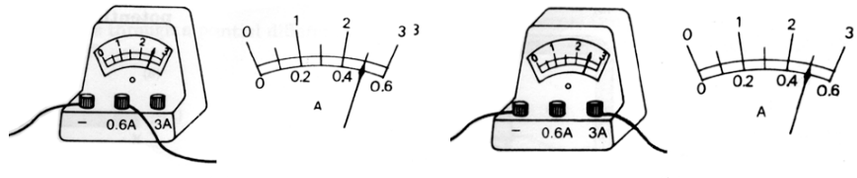
Jika generator tersebut dihubungkan dengan rangkaian tertutup, akan mengalir arus.



Gambar 6.17
Cara pengukuran dengan *testpen*

2. Alat Ukur Tegangan dan Arus Bolak-Balik

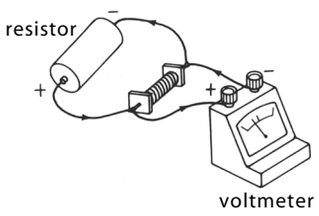
Untuk mengetahui adanya tegangan listrik pada suatu rangkaian, salah satunya digunakan sebuah alat yang disebut *testpen* (**Gambar 6.17**). Akan tetapi, testpen tidak dapat mengetahui besarnya tegangan yang mengalir pada rangkaian tersebut. Adapun untuk mengukur nilai tegangan dan kuat arus AC digunakan voltmeter AC dan amperemeter AC. Nilai yang terbaca pada alat ukur ini menunjukkan harga efektif dari tegangan dan kuat arus. Melalui **Gambar 6.18**, Anda dapat memahami hasil pengukuran arus listrik dalam sebuah rangkaian.



(a) (b)

Gambar 6.18
Pengukuran arus listrik dengan menggunakan volmeter.

Pada **Gambar 6.18(a)**, terminal kutub positif dihubungkan dengan arus maksimum 0,6 A, pada amperemeter terbaca nilai arus 0,5 A, sedangkan **Gambar 6.18(b)** terminal positif dihubungkan dengan arus maksimal 3 A ternyata terbaca nilai arus 2,5 A. Pengukuran ini menunjukkan bahwa angka yang terbaca pada alat ukur adalah nilai efektifnya. Demikian pula dalam mengukur tegangan sebuah rangkaian seperti **Gambar 6.19**. Ketika arus mengalir, jarum penunjuk voltmeter mulai berubah. Nilai yang terbaca menunjukkan harga efektif tegangan rangkaian listrik. Anda dapat juga mengukur kuat arus, tegangan, dan hambatan listrik baik arus AC maupun arus DC dengan menggunakan multimeter (Amperemeter, Voltmeter, dan Ohmmeter) dan osiloskop.



Gambar 6.19
Pengukuran tegangan pada sebuah rangkaian

Contoh 6.10

Dari pengamatan melalui osiloskop, sumbu vertikal diatur pada tegangan 3 V/cm, sedangkan selang waktu menunjukkan 8 ms/cm. Skala tiap kotak memiliki ukuran 1 cm × 1 cm. Tentukan:

a. tegangan maksimum;
b. frekuensi sumber.

Jawab:

Diketahui: $V_{pp} = 3$ V/cm

a. Pada gambar terbaca tegangan puncak (V_{pp}) adalah 6 cm, karena skala vertikal 3 V/cm maka
$V_{pp} = 6 \text{ cm} \times 3 \text{ V/cm} = 18$ volt. Jadi tegangan maksimumnya adalah
$V_{maks} = \frac{1}{2} Vpp = \frac{1}{2}(18 \text{ V}) = 9 \text{ V}$

b. Periode dalam grafik 4 cm. Skala horizontal 8 ms/cm maka
$T = 4 \text{ cm} \times 8 \text{ ms/cm} = 32 \text{ ms} = 0{,}032 \text{ s}.$
Jadi, frekuensi sumber $f = \frac{1}{T} \Rightarrow f = \frac{1}{0{,}032} = 31{,}25$ Hz

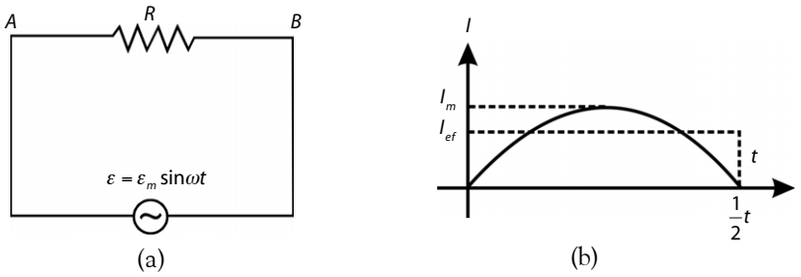
3. Nilai Efektif Tegangan dan Kuat Arus AC

Alat ukur yang digunakan untuk mengetahui jumlah daya yang terpakai pada kebutuhan energi listrik di rumah adalah kWh meter. Deretan angka menunjukkan besar energi listrik yang terpakai.

Perhatikan **Gambar 6.20**. Tampak jelas angka yang menunjukkan besar energi listrik yang terpakai dalam satuan kWh (*kilo Watt hour*). Energi ini diperoleh dari nilai I_{ef} dan V_{ef}. Harga efektif arus atau tegangan bolak-balik adalah kuat arus atau tegangan bolak-balik yang dianggap setara dengan arus atau tegangan searah yang menghasilkan jumlah kalor yang sama ketika melalui suatu penghantar dalam waktu yang sama.



Gambar 6.20
kWh meter yang ada di rumah digunakan untuk mengukur daya listrik yang terpakai.



(a) (b)

Gambar 6.21
(a) Sebuah rangkaian dengan hambatan *R;*
(b) Grafik hubungan *I* dengan *t*.

Sebuah penghantar seperti **Gambar 6.21(a)** memiliki hambatan *R* dalam waktu $\frac{1}{2} t$. Besar energi kalor yang dihasilkan oleh arus efektifnya adalah

$$Q_{ef} = I^2_{ef} R \frac{1}{2} t \qquad (6\text{–}30)$$

Energi kalor yang dihasilkan dalam rangkaian arus AC memiliki nilai yang selalu berubah secara periodik dalam waktu $\frac{1}{2} T$ dan memenuhi persamaan

$$Q_{AC} = \int_0^{\frac{1}{2}t} I^2 \, R \, dt \qquad (6\text{–}31)$$

Persamaan (6–30) dan **Persamaan (6–31)** memiliki nilai yang sama sehingga dapat diperoleh besar arus efektifnya

$$Q_{ef} = Q_{AC}$$

$$I^2_{ef} \, R \, \frac{1}{2} t = \int_0^{\frac{1}{2}t} I^2 \, R \, dt$$

$$I^2_{ef} \, R \, \frac{1}{2} t = \frac{I^2_{maks}}{2} R \frac{1}{2} t \qquad (6\text{–}32)$$

dengan menggunakan cara matematika diperoleh arus efektif (I_{ef}) sebagai berikut.

$$I_{ef} = \frac{I_{maks}}{2} \qquad (6\text{–}33)$$

Dengan cara yang sama, tegangan efektif (V_{ef}) akan diperoleh persamaan:

$$V_{ef} = I_{ef} R$$

$$V_{ef} = \frac{V_{maks}}{\sqrt{2}} \qquad (6\text{–}34)$$

Contoh 6.11

Sebuah rangkaian yang dihubungkan dengan sumber listrik bolak-balik, diukur dengan voltmeter dan menunjukkan angka 20 volt. Berapakah harga maksimum tegangan bolak-balik sumber dan tuliskan persamaannya jika frekuensinya 60 Hz.

Jawab:

Diketahui:

$V_{ef} = 20$ V;

$f = 60$ Hz.

a. Nilai tegangan maksimum V_{maks} dihitung dengan menggunakan **Persamaan (6–34)** sehingga diperoleh:

$$V_{maks} = V_{ef}\sqrt{2}$$
$$= 20\sqrt{2} \text{ V}$$

b. Persamaan tegangan diperoleh dengan menggunakan **Persamaan (6–29)**, yaitu

$$V = V_{maks} \sin \omega t$$
$$= 20\sqrt{2} \sin 120\pi t$$



Tantangan untuk Anda

Apakah yang menyebabkan sengatan listrik, arus listrik, atau tegangan listrik?

Contoh 6.12

Sebuah rangkaian arus bolak-balik memiliki harga tegangan sebagai fungsi waktu, yaitu $V = 50\sqrt{2}\sin 50$ V. Hitunglah:

a. tegangan maksimum (V_{maks});
b. tegangan puncak ke puncak (V_{pp});
c. tegangan efektif (V_{ef});
d. frekuensi anguler (ω);
e. periode (T);
f. frekuensi (f);
g. tegangan setelah $t = 0{,}015\,\pi$ sekon.

Jawab:

Dengan menyamakan persamaan tegangan yang diketahui terhadap **Persamaan (6–29)**, maka diperoleh:

$V = V_m \sin \omega t \Rightarrow V = 50\sqrt{2}\sin 50\,t$

dari persamaan tersebut diperoleh:

$V = 50\sqrt{2}$ V dan $\omega = 50$ rad/s

a. $V_m = 50\sqrt{2}$ V

b. $V_{pp} = 2\,V_m = 2\,(50\sqrt{2}\text{ V}) = 100\sqrt{2}$ V

c. $V_{ef} = \dfrac{V_m}{\sqrt{2}} = \dfrac{50\sqrt{2}}{\sqrt{2}}\text{ V} = 50$ V

d. $\omega = 50$ rad/s

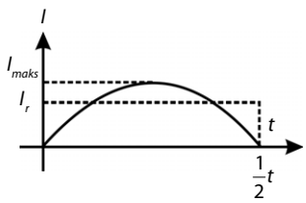
e. $\omega = \dfrac{2\pi}{T} \Rightarrow T = \dfrac{2\pi}{\omega} = \dfrac{2\pi}{50} = \dfrac{\pi}{25}$ s

f. $f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{25}{\pi}$ Hz

g. $V = 50\sqrt{2}\sin 50\,t = 50\sqrt{2}\sin 50(0{,}015\,\pi) = 50$ V

4. Harga Kuat Arus dan Tegangan Rata-Rata

Harga kuat arus bolak-balik rata-rata adalah kuat arus bolak-balik yang nilainya setara dengan kuat arus searah untuk memindahkan muatan listrik yang sama dalam waktu yang sama. Perhatikan grafik sinusoida dari arus AC selama $\frac{1}{2}T$ sekon (**Gambar 6.22**).



Gambar 6.22
Grafik hubungan I dan t
I_{maks} = kuat arus maksimum
I_r = kuat arus rata-rata.

Untuk arus searah, setelah $\frac{1}{2}T$ (setengah periode) muatan yang dilaluinya memenuhi persamaan:

$$I_{dc} = I_r \frac{1}{2}T \qquad (6\text{–}35)$$

Adapun jumlah muatan yang dilalui arus bolak-balik dalam rangkaian adalah:

$$I_{ac} = \int_0^{\frac{1}{2}T} I_{maks} \sin \omega t\,dt \qquad (6\text{–}36)$$

Tugas Anda

Arus listrik bolak-balik dapat diamati menggunakan osiloskop. Bersama kelompok belajar Anda, gunakan osiloskop yang ada di laboratorium sekolah Anda untuk mempelajari penggunaan osiloskop tersebut. Catatlah hal-hal yang Anda anggap penting. Mintalah bimbingan guru Fisika Anda untuk melakukan tugas ini.

Dari **Persamaan (6–35)** dan **Persamaan (6–36)** akan diperoleh persamaan arus rata-rata sebagai berikut.

$$I_r = \int_0^{\frac{1}{2}T} I_{maks} \sin \omega t dt \qquad (6–37)$$

Dengan menggunakan cara matematika, diperoleh:

$$I_r = \frac{2I_{maks}}{\pi} \qquad (6–38)$$

Dengan penjabaran yang sama akan diperoleh persamaan tegangan rata-rata untuk arus AC sebesar:

$$V_r = \frac{2V_{maks}}{\pi} \qquad (6–39)$$

Keterangan:
V_r = tegangan rata-rata (V)
V_{maks} = tegangan maksimum (V)

Contoh 6.13

Persamaan tegangan bolak-balik suatu rangkaian listrik memenuhi persamaan $V = 314 \sin 50\pi$ V. Tentukan tegangan rata-rata yang dihasilkan sumber tersebut.

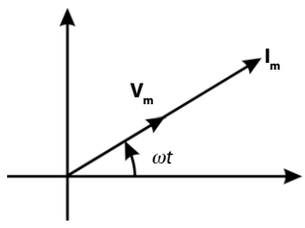
Jawab:
Diketahui: $V = 314 \sin 50\pi$ V; $V_{maks} = 314$ V.

Dengan menggunakan **Persamaan (6–39)** diperoleh

$$V_r = \frac{2V_{maks}}{\pi} = \frac{2(314\text{ V})}{3{,}14} = 200\text{ V}$$

5. Diagram Fasor

Untuk mempermudah menganalisis arah tegangan dan kuat arus, digunakan metode diagram fasor. Fasor (*phase vektor*) adalah suatu besaran yang dilukiskan sebagai suatu vektor yang besar sudut putarnya terhadap sumbu horizontal sama dengan sudut fasenya $\theta = \omega t$. Fasor suatu vektor berputar berlawanan arah jarum jam dengan kecepatan sudut ω tetap digambarkan oleh sebuah anak panah untuk menyatakan tegangan dan kuat arus dari suatu rangkaian listrik. Pada **Gambar 6.23** dapat Anda perhatikan diagram fasor dari tegangan dan arus bolak-balik.

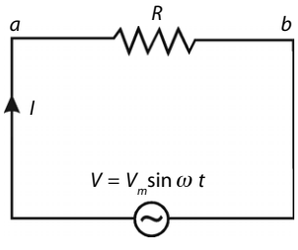


Gambar 6.23
Grafik fasor *I* dan *V*

Sumbu horizontal pada **Gambar 6.23** adalah untuk menentukan besarnya sudut fase yang diukur dalam satuan derajat atau radian, sedangkan sumbu vertikal untuk menentukan nilai tegangan dan kuat arus yang merupakan besaran skalar (bukan vektor). Melalui metode diagram fasor ini diharapkan Anda dapat memahami arah fase vektor dengan mudah.

6. Resistor pada Rangkaian Arus Bolak-Balik

Pada **Gambar 6.24** sebuah resistor murni *R* dipasang dalam rangkaian tertutup arus bolak-balik. Grafik tegangan sumber yang bersifat sinusoida akan menghasilkan arus yang juga bersifat sinusoida.



Gambar 6.24
Rangkaian arus AC dengan hambatan murni *R*.

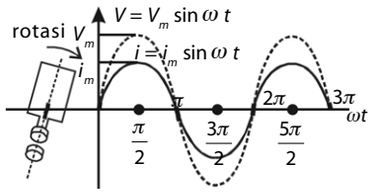
Persamaan tegangan bolak-balik antara ujung-ujung resistor murni R adalah

$$V = V_m \sin \omega t \qquad (6\text{–}40)$$

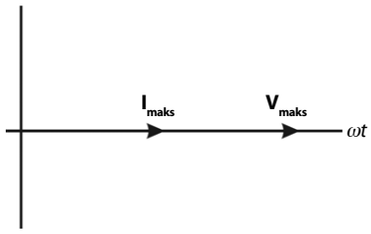
Dengan memerhatikan **Hukum Ohm** yang menyatakan bahwa kuat arus yang mengalir $I = \frac{V}{R}$ memiliki hubungan dengan $I_m = \frac{V_m}{R}$, maka besar arus bolak-balik yang mengalir melalui rangkaian memenuhi persamaan:

$$I = I_m \sin \omega t \qquad (6\text{–}41)$$

Perhatikan **Gambar 6.25**. Berdasarkan **Persamaan (6–40)** dan **Persamaan (6–41)**, arus maksimum dan tegangan maksimum memiliki fase yang sama. Artinya, ketika posisi kumparan mencapai sudut π (180°) tegangan dan arus yang melalui rangkaian mencapai nilai minimum. Lebih jelasnya, Anda perhatikan **Gambar 6.26**. Diagram fasor dari kuat arus dan tegangannya memiliki arah yang sama.



Gambar 6.25
Grafik kuat arus *I* dan tegangan *V* pada rangkaian hambatan murni, arus *I*, dan tegangan *V* sefase.



Gambar 6.26
Diagram fasor arus *I* dan tegangan *V* memiliki arah yang sama.

Mari Mencari Tahu

Resistor merupakan salah satu komponen listrik yang sering digunakan. Setiap resistor yang dijual di pasaran memiliki nilai resistansi tertentu. Tugas Anda, buatlah resume mengenai cara mengidentifikasi nilai sebuah resistor. Setelah membuat resume ini, diharapkan Anda dapat mengenali resistor dan mampu menentukan nilai resistansinya dari ciri-ciri yang dimiliki resistor tersebut. Agar lebih menarik, sertakan gambar macam-macam resistor dalam tulisan Anda.

7. Induktor Murni pada Rangkaian Arus Bolak-Balik

Perhatikan **Gambar 6.27**. Sebuah induktor murni memiliki induktansi diri L. Pada saat arus listrik mengalir dalam rangkaian, akan timbul gaya gerak listrik induksi (ggl) di antara ujung induktor yang besarnya adalah:

$$\varepsilon = -L\frac{dI}{dt}$$

Adapun beda tegangan antara ujung-ujung kumparan sebagai fungsi waktu adalah

$$V = V_m \sin \omega t \qquad (6\text{–}42)$$

Jika Anda perhatikan rangkaian arus bolak-balik dalam **Gambar 6.28**, rangkaian tersebut merupakan rangkaian tertutup dan berlaku Hukum II Kirchoff. Hukum II Kirchoff, menyatakan bahwa

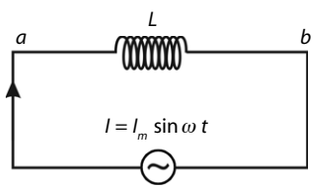
$$\Sigma IR + \Sigma\varepsilon = 0$$

Oleh karena dalam rangkaian tersebut resistor murni tidak ada, yaitu nilai $R = 0$, maka diperoleh persamaan kuat arus sebagai berikut.

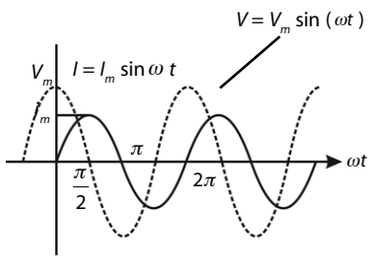
$$IR + E_{sumber} + E_{induktor} = 0$$

$$0 + V_m \sin \omega t - L\frac{dI}{dt} = 0$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_m}{L} \sin \omega t$$



Gambar 6.27
Rangkaian arus bolak-balik dipasang seri dengan sebuah induktor murni.



Gambar 6.28
Grafik kuat arus *I* dan tegangan *V* pada rangkaian induktif murni. Tegangan *V* mendahului arus *I* sekitar 90°.

$$\int dI = \frac{V_m}{L}\int \sin \omega t \, dt$$

$$I = \frac{V_m}{\omega L}(-\cos \omega t)$$

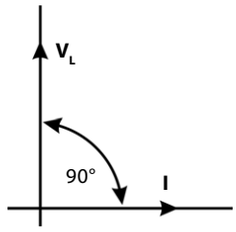
$$I = \frac{V_m}{\omega L}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\boxed{I = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)} \qquad (6\text{–}43)$$

Dengan memerhatikan penurunan **Persamaan (6–43)** diketahui bahwa $I_m = \frac{V_m}{\omega L}$. Menurut Hukum Ohm, ωL merupakan nilai hambat induktor yang disebut reaktansi induktif (X_L) sehingga dapat ditulis

$$\boxed{X_L = \omega L \text{ atau } X_L = 2\pi f L} \qquad (6\text{–}44)$$

Keterangan:
X_L = reaktansi induktif (Ω)
ω = kecepatan sudut (rad/s)
L = induktansi diri (H)
f = frekuensi (Hz)



Gambar 6.29
Diagram fasor arus *I* dan tegangan *V*. Tegangan mendahului 90°.

Dengan mengamati hubungan **Persamaan (6–42)** dan **Persamaan (6–43)**, diketahui perbedaan fase antara tegangan dan kuat arus yang melalui rangkaian induktif tersebut sebesar $\frac{\pi}{2}$. Dengan sudut fase arus tertinggal adalah $\frac{\pi}{2}$ rad dari sudut fase tegangan.

Anda akan lebih memahami jika memerhatikan grafik tegangan sinusoidal dan grafik arus sinusoidal terhadap waktu melalui **Gambar 6.29**. Jika tegangan pada ujung-ujung rangkaian maksimum, nilai arus dalam rangkaian akan minimum $I = 0$. Sebaliknya, jika tegangan bernilai minimum, arus yang melalui rangkaian akan maksimum $I = I_{maks}$.

Contoh 6.14

Pada sebuah rangkaian arus bolak-balik dengan frekuensi $\frac{100}{\pi}$ Hz dipasang induktor sebesar 0,25 H. Rangkaian ini menghasilkan arus maksimum 2 A. Hitung tegangan maksimum induktor tersebut.

Jawab:
Diketahui:

frekuensi (f) = $\frac{100}{\pi}$;

arus maksimum (I_m) = 2 A;

induktansi induktor (L) = 0,25 H.

Tegangan maksimum dapat dihitung dengan persamaan

$$V_m = X_L I_m$$

$$= 2\pi f L I_m$$

$$= 2\pi\left(\frac{100}{\pi}\text{Hz}\right)(0,25\text{ H})(2\text{ A}) = 100\text{ V}$$

8. Kapasitor pada Rangkaian Arus Bolak-Balik

Prinsip kegunaannya sama dengan induktor. Kapasitor dalam rangkaian arus bolak-balik dipasang untuk memperoleh energi listrik yang lebih besar. Arus listrik yang melalui kapasitor yang kapasitasnya sebesar C selama Δt akan menyebabkan kapasitor berisi muatan sebesar

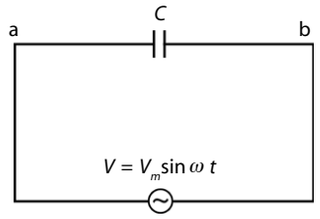
$$\Delta Q = I\Delta t \qquad (6\text{–}45)$$

Adapun muatan yang tersimpan dalam kapasitor (**Gambar 6.31**) adalah

$$\Delta Q = C\,\Delta V_{ab} \qquad (6\text{–}46)$$

di mana

$$V_{ab} = V = V_m \sin \omega t \qquad (6\text{–}47)$$



Gambar 6.30
Rangkaian kapasitor

Dari kedua **Persamaan (6–42)** dan **Persamaan (6–43)** dapat diperoleh

$$C\Delta V_{ab} = I\Delta t$$

$$I = C\frac{dV_{ab}}{dt} = C\frac{d\left(V_m \sin \omega t\right)}{dt}$$

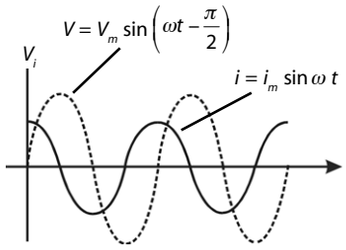
$$I = C(0 \sin \omega t + V_m \omega \cos \omega t)$$

$$I = V_m \omega C \cos \omega t$$

$$I = I_m \cos \omega t$$

$$I = I_m \sin\left(\frac{\pi}{2} + \omega t\right) \qquad (6\text{–}48)$$

Dengan memerhatikan penurunan **Persamaan (6–48)**, diketahui bahwa $I_m = V_m \omega C$. Menurut Hukum Ohm, $\frac{1}{\omega C}$ merupakan nilai hambatan kapasitor yang disebut reaktansi kapasitif (X_L) sehingga dapat ditulis



Gambar 6.31
Grafik *I* dan *V* pada kapasitor dalam rangkaian AC.

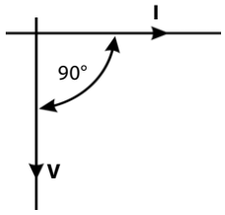
$$X_C = \frac{1}{\omega C} \text{ atau } X_C = \frac{1}{2\pi f C} \qquad (6\text{–}49)$$

Keterangan:
X_C = reaktansi kapasitif (Ω)
C = kapasitas kapasitor (F)
ω = frekuensi sudut (rad/s)

Dengan mengamati hubungan **Persamaan (6–47)** dan **Persamaan (6–48)** diketahui perbedaan fase antara tegangan dan kuat arus yang melalui rangkaian kapasitif tersebut sebesar $\frac{\pi}{2}$. Dengan sudut fase arus mendahului adalah $\frac{\pi}{2}$ rad dari sudut fase tegangan.

Anda akan lebih memahami jika memerhatikan grafik tegangan sinusiodal dan grafik arus sinusiodal terhadap waktu melalui **Gambar 6.32**.

Jika tegangan pada ujung-ujung rangkaian maksimum, nilai arus dalam rangkaian akan maksimum $I = I_m$. Sebaliknya, jika tegangan bernilai maksimum, arus yang melalui rangkaian akan minimum $I = 0$.



Gambar 6.32
Diagram fasor *I* dan *V* pada kapasitor.

Tabel 6.1
Rangkaian *R*, *L*, dan C pada Rangkaian Arus Bolak-Balik

No.	Rangkaian	Reaktansi	Sifat	Bentuk Persamaan I untuk $V = V_m \sin \omega t$
1.	Resistor (*R*)	R	sefase	$I = I_m \sin \omega t$
2.	Induktor (*L*)	$X_L = \omega l$	I tertinggal V sebesar $\frac{1}{2}\pi$ rad	$I = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$
3.	Kapasitor (C)	$X_C = \frac{1}{\omega C}$	I mendahului V sebesar $\frac{1}{2}\pi$ rad	$I = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$

Tabel 6.1 menggambarkan persamaan arus yang mengalir dalam tiap rangkaian. Jika sumber tegangan bolak-balik dianggap sama, yaitu $V = V_m \sin \omega t$.

Sebetulnya, Anda dapat menentukan terlebih dahulu persamaan arus baru kemudian persamaan tegangannya. Misalnya, arus yang mengalir dalam tiap rangkaian sama, $I = I_m \sin \omega t$ maka akan didapat persamaan tegangan pada:

a. resistor, $V = V_m \sin \omega t$;

b. induktor, $V = V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$;

c. kapasitor, $V = V_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$.

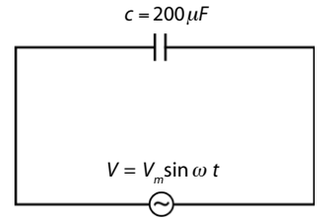


Tantangan untuk Anda

Sebuah kapasitor 100 μ F dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik. Arus yang mengalir melalui rangkaian memenuhi persamaan $I = 4 \sin 200t$ A. Tuliskan persamaan tegangan kapasitor itu.

Contoh 6.15

Sebuah kapasitor dengan C = 200 μ F dipasang pada sumber tegangan bolak-balik dengan frekuensi $f = \frac{50}{\pi}$ Hz. Tegangan maksimum V_m = 100 V, seperti pada gambar berikut.



Hitung arus maksimum pada kapasitor tersebut.

Jawab:

Diketahui: $C = 200\ \mu F = 2 \times 10^{-4}$ F; $f = \frac{50}{\pi}$ Hz; $V_m = 100$ V;

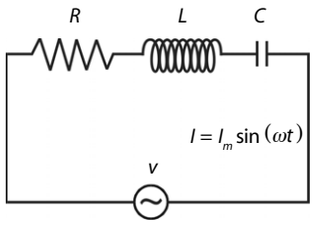
$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{50}{\pi} = 100 \text{ rad/s}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \frac{1}{(100 \text{ rad/s})(2 \times 10^{-4} \text{ F})} = 50\ \Omega$$

Oleh karena itu, arus maksimumnya adalah $I_m = \frac{V_m}{X_C} = \frac{100}{50} = 2$ A.

9. *R, L,* dan *C* Dipasang Seri dalam Rangkaian Arus Bolak-Balik

Rangkaian arus listrik bolak-balik yang memiliki hambatan murni R dipasang seri dengan induktor L serta kapasitor C akan menghasilkan tambahan energi listrik yang lebih besar, tetapi rangkaian R–L–C seri ini hanya dapat digunakan untuk memperbesar daya listrik yang terbatas. Arus maksimum dalam rangkaian memiliki nilai dan fase yang sama pada setiap komponen. Lebih jelas dapat Anda perhatikan **Gambar 6.33**.



Gambar 6.33
Resonansi rangkaian R–L–C seri

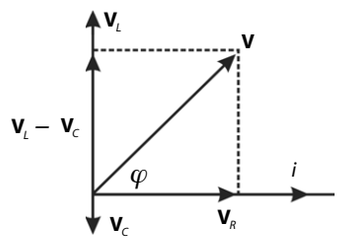
Jika Anda tetapkan persamaan arus dalam rangkaian sebesar $I = I_m \sin(\omega t)$, persamaan setiap tegangan (dengan memerhatikan diagram fasor pada **Gambar 6.34**), yaitu:

$V_R = V_{Rm} \sin \omega t$ (memiliki fase yang sama dengan arus I);

$V_L = V_{Lm} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ (mendahului fase I sebesar $\frac{\pi}{2}$ rad);

$V_C = V_{Cm} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$ (tertinggal fase I sebesar $\frac{\pi}{2}$ rad).

Perhatikan rangkaian R–L–C seri pada **Gambar 6.34**. Setiap komponen memiliki tegangan V_R, V_L, dan V_C. Secara fasor, tegangan-tegangan ini dapat dijumlahkan sebagai berikut.



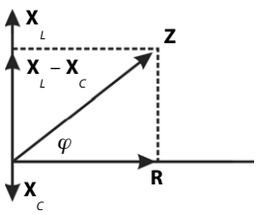
Gambar 6.34
Diagram fasor V, V_R, V_L, dan V_C.

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_R + \mathbf{V}_L + \mathbf{V}_C \qquad (6\text{–}50)$$

Oleh karena $\mathbf{V}_R$, $\mathbf{V}_L$, dan $\mathbf{V}_C$ saling tegak lurus, harga V dapat ditentukan dengan menggunakan hitung vektor, yaitu

$$V = \sqrt{(V_R)^2 + (V_L - V_C)^2} \qquad (6\text{–}51)$$

dengan memerhatikan kembali **Gambar 6.45**, hambatan total rangkaian seri R–L–C yang disebut dengan impedansi rangkaian (z) dapat dihitung dari **Persamaan (6–50)**.



Gambar 6.35
Diagram fasor $\mathbf{Z}$, $\mathbf{R}$, $\mathbf{X}_L$, dan $\mathbf{X}_C$.

$$V = I\,Z = \sqrt{(I_R R)^2 + (I\,X_L - I\,X_C)^2}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \qquad (6\text{–}52a)$$

atau

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \qquad (6\text{–}52b)$$

Oleh karena arus maksimum yang mengalir di setiap komponen sama besarnya, hubungan antara tegangan maksimum dan arus maksimum ini memenuhi persamaan $V = I\,Z$, yaitu

$$V = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \qquad (6\text{–}53)$$

Keterangan:
V_m = tegangan maksimum
Z = impedansi rangkaian
X = $X_L - X_C$ = reaktansi total

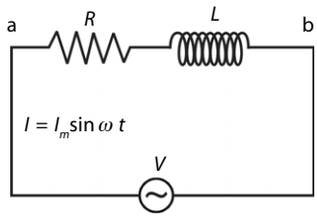
Beda fase antara tegangan dan kuat arus dapat ditentukan sebagai berikut.

$$\tan\varphi = \frac{V_L - V_C}{V_R} = \frac{X_L - X_C}{R} \qquad (6\text{–}54)$$

sehingga persamaan tegangannya adalah $V = V_{ab} = V_m \sin(\omega t + \varphi)$.

Apabila $X_L > X_C$, sudut fase φ bernilai positif. Artinya, tegangan mendahului arus dan rangkaian bersifat induktif. Jika $X_C > X_L$, sudut fase φ bernilai negatif. Artinya, tegangan tertinggal oleh arus dan rangkaian bersifat kapasitif. Jika $X_L = X_C$, diperoleh $X = 0$ dan $Z = R$. Artinya, tegangan memiliki fase sama, sedangkan rangkaian bersifat resistif. Dalam hal ini dikatakan telah terjadi resonansi.

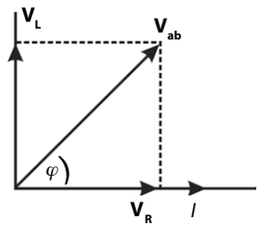
10. *R* dan *L* Dipasang Seri dalam Rangkaian Arus Bolak-Balik



Gambar 6.36
Rangkaian *R* dan *L* dipasang seri

Perhatikan **Gambar 6.36**. Setiap komponen memiliki tegangan V_R dan V_L. Secara fasor, tegangan-tegangan ini dapat dijumlahkan sebagai $\mathbf{V} = \mathbf{V_R} + \mathbf{V_L}$. Dengan menggunakan hitungan vektor besarnya tegangan total yaitu:

$$V = \sqrt{V_R^2 + V_L^2} \qquad (6\text{–}55)$$



Gambar 6.37
Diagram fasor V_L dan V_R

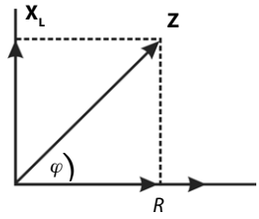
Besarnya impedansi rangkaian R–L diperoleh seperti berikut.

$$V = I\,Z = \sqrt{(I\,R)^2 + (I\,X_L)^2}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^{\,2}} \qquad (6\text{–}56)$$

atau

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega\,L)^2} \qquad (6\text{–}57)$$

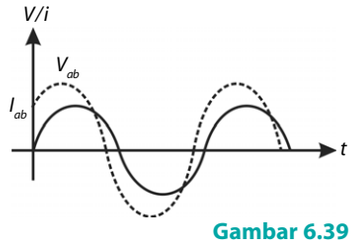


Gambar 6.38
Diagram fasor V_L dan V_R

Beda fase antara tegangan dan kuat arus dapat ditentukan sebagai berikut.

$$\tan\varphi = \frac{V_L}{V_R} = \frac{X_L}{R} \qquad (6\text{–}58)$$

Perhatikan **Gambar 6.39**, tampak bahwa tegangan mendahului arus sebesar φ rad sehingga jika $I = I_m \sin\omega t$ maka $V = V_m \sin(\omega t + \varphi)$.



Gambar 6.39
Grafik tegangan mendahului arus dengan beda fase $0 < \varphi < 90°$.

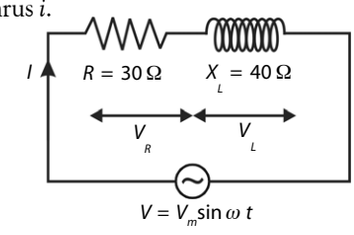
Contoh 6.16

Sebuah resistor $R = 30\ \Omega$ dipasang seri dengan induktor $X_L = 40\ \Omega$ pada tegangan bolak-balik 100 V.

a. Hitung impedansi rangkaian, fase rangkaian, kuat arus, V_R dan V_L.
b. Tentukan fase V_L, V_R, dan V terhadap kuat arus i.

Jawab:

Diketahui:
resistor murni $R = 30\ \Omega$;
reaktansi induktor $X_L = 40\ \Omega$;
tegangan sumber $V = 100$ V.



a. Impedansi Z dihitung melalui **Persamaan (6–56)**.

$Z^2 = R^2 + X_L^2$

$= (30\ \Omega)^2 + (40\ \Omega)^2 = 50\ \Omega$

fase tegangan (φ) dihitung dengan **Persamaan (6–58)**

$$\tan \varphi = \frac{X_L}{R} = \frac{30\,\Omega}{40\,\Omega} = 0{,}75$$

$$\varphi = 36{,}87°$$

Kuat arus $I = \dfrac{V}{Z} = \dfrac{100\ \text{V}}{50\ \Omega} = 2\ \text{A}$

Tegangan $V_R = IR = (2\ \text{A})(30\ \Omega) = 60\ \text{V}$

Tegangan induktor $V_L = IX_L = (2\ \text{A})(40\ \Omega) = 80\ \text{V}$

b. V_R sefase dengan kuat arus I ($\varphi = 0$)

V_L mendahului I sebesar $\dfrac{\pi}{2}$ rad ($\varphi = 90°$)

V mendahului I ($\varphi = 36{,}87°$)

Contoh 6.17

Dalam rangkaian seri dipasang resistor murni $R = 40\ \Omega$ dan sebuah induktor $L = 0{,}4$ H pada tegangan bolak-balik dengan persamaan $V = 200 \sin 100t$ V. Tuliskan persamaan kuat arus dalam rangkaian tersebut.

Jawab:

Diketahui: $R = 40$ ohm; $V = 200 \sin 100t$ V, maka $V_m = 200$ V;

$L = 0{,}4$ H; $X_L = \omega L = (100)(0{,}4) = 40\ \Omega$.

$Z^2 = R^2 + X_L^2 = (40)^2 + (40)^2 = 40\sqrt{2}\ \Omega$

$$\tan \varphi = \frac{X_L}{R} = \frac{40\ \Omega}{40\ \Omega} = 1$$

$$\varphi = 45° = \frac{\pi}{4} \text{ rad}$$

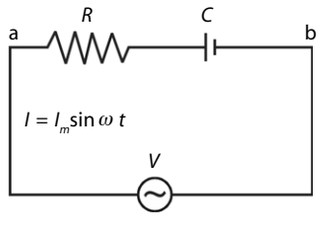
Jadi, persamaan kuat arusnya adalah $I = I_m \sin(\omega t + \varphi)$

$$I = 2{,}5\sqrt{2} \sin\left(100t - \frac{\pi}{4}\right) \text{A}$$

11. *R* dan *C* Dipasang Seri dalam Rangkaian Arus Bolak-Balik

Perhatikan **Gambar 6.40**. Resistor R dan kapasitor C dipasang seri dalam rangkaian arus bolak-balik. Di antara titik a dan b terdapat tegangan total yang besarnya sama dengan jumlah tegangan resistor (V_R) dan tegangan kapasitor (V_C). Secara vektor besar tegangan total tersebut adalah

$$V = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} \qquad (6\text{–}59)$$



Gambar 6.40
Rangkaian seri *R*-*C* dalam rangkaian arus AC.

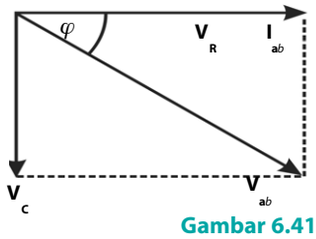
Besarnya impedansi rangkaian *R*–*C* dapat dihitung seperti berikut.

$$V = I\,Z = \sqrt{(I\,R)^2 + (I\,X_C)^2}$$

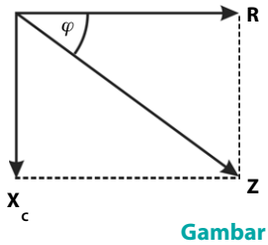
$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \qquad (6\text{–}60)$$

atau

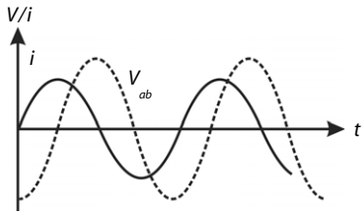
$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \qquad (6\text{–}61)$$



Gambar 6.41
Diagram fasor tegangan V_{ab} terhadap V_c.



Gambar 6.42
Diagram fasor vektor hambatan R terhadap X_c.



Gambar 6.43
Grafik tegangan V_{ab} terhadap arus

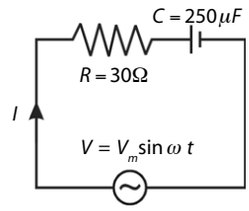
Beda fase tegangan dan kuat arus dapat ditentukan sebagai berikut.

$$\tan\varphi = \frac{V_C}{V_R} = \frac{X_C}{R} \qquad (6\text{–}62)$$

Pada **Gambar 6.43**, tampak bahwa tegangan terlambat sebesar φ rad dari arus. Secara matematis dapat disimpulkan jika $I = I_m \sin\omega t$, $V = V_m \sin(\omega t - \varphi)$.

Contoh 6.18

Dalam sebuah rangkaian, $R = 30\,\Omega$ dipasang seri dengan $C = 250\,\mu F$ dan dihubungkan ke sumber tegangan bolak-balik yang frekuensinya $\frac{50}{\pi}$ Hz. Hitunglah impedansi rangkaian tersebut.



Jawab:

Diketahui: $R = 30\ \Omega$;

$C = 250\,\mu F = 2{,}5 \times 10^{-4}$ F;

$f = \frac{50}{\pi}$ Hz.

$$\omega = 2\,\mu F = 2\pi\left(\frac{50}{\pi}\text{ Hz}\right) = 100\text{ rad/s}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{(100\text{ rad/s})(2{,}5\times10^{-4}\text{ F})} = 40\,\Omega$$

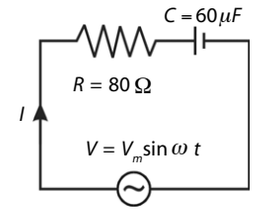
Impedansi rangkaian Z dapat dihitung dengan menggunakan **Persamaan (6–60)**, yaitu

$Z^2 = R^2 + X_C^2 = 30^2 + 40^2 = 50\,\Omega$

Contoh 6.19

Rangkaian seri R – C dengan resistor $80\,\Omega$ dan reaktansi kapasitif $X_C = 60\,\Omega$ dihubungkan ke sumber tegangan 200 V dengan frekuensi $\frac{80}{\pi}$ Hz. Hitunglah:

a. impedansi rangkaian;
b. arus yang mengalir;
c. kapasitas kapasitor;
d. beda tegangan antara ujung-ujung hambatan dan kapasitor;
e. sudut fase rangkaian;
f. persamaan arus, jika persamaan tegangan $V = V_m \sin\omega t$.



Jawab:

Diketahui: $R = 80\ \Omega$; $V_{ef} = 200$ V;

$X_C = 60\,\Omega$; $f = \frac{80}{\pi}$ Hz.

a. Impedansi rangkaian dihitung dengan menggunakan **Persamaan (6–60)**.
$Z^2 = R^2 + X_C^{\,2} = 80^2 + 60^2$
$Z = 100\,\Omega$

b. Arus terukur yang melalui rangkaian (I_{ef}) adalah

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{Z} = \frac{200\text{ V}}{100\ \Omega} = 2\text{ A}$$

c. Kapasitas kapasitor (C):

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{(2\pi)\left(\frac{80}{\pi}\right)(60\ \Omega)} = 104\,\mu F$$

d. Tegangan hambatan V_R dan tegangan kapasitor V_C:
$V_R = IR = (2\text{ A})(80\ \Omega) = 160\text{ V}$
$V_c = IX_C = (2\text{ A})(60\ \Omega) = 120\text{ V}$

e. Sudut fase rangkaian φ:

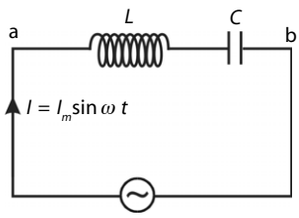
$$\tan\varphi = \frac{-X_C}{R} = \frac{-60\ \Omega}{80\ \Omega} = -\frac{3}{4}$$

$\varphi = -37°$

f. Untuk persamaan tegangan $V = V_m \sin\omega t$, maka
$I = I_m \sin(\omega t + \varphi)$
$= I_{ef}\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi)$
$= 2\sqrt{2}\sin(160t - 37°)$

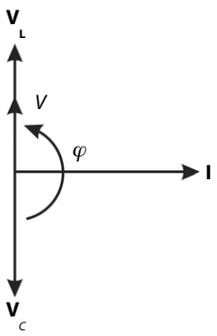
12. *L* dan *C* Dipasang Seri dalam Rangkaian Arus Bolak-Balik

Diketahui sebuah rangkaian arus bolak-balik dipasang sebuah induktor L dan sebuah kapasitor yang berkapasitas C. Kemudian, keduanya dihubungkan secara seri seperti **Gambar 6.44**, maka akan timbul perbedaan fase antara tegangan induktor V_L dan tegangan kapasitor V_C sebesar π rad atau 180°.



Gambar 6.44
Rangkaian seri *L* dan *C*

Untuk mempermudah pemahaman beda fase dalam persamaan tegangan, ditetapkan persamaan kuat arus yang mengalir dalam rangkaian adalah $I = I_m \sin(\omega t)$. Melalui **Gambar 6.45** terbaca bahwa V_L mendahului arus sebesar $\frac{1}{2}\pi$ rad, dan V_C tertinggal terhadap I sebesar $\frac{1}{2}\pi$ rad sehingga setiap tegangan akan memiliki persamaan sebagai berikut.



Gambar 6.45
Diagram fasor *I*, V_L, dan V_C

$$V_L = V_{Lm}\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \text{ sedangkan } V_C = V_{Cm}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

Perhatikan kembali diagram fasor pada **Gambar 6.45**. Secara vektor dapat dijumlahkan sebagai berikut.

$$V = V_L - V_C \qquad (6\text{–}63)$$

Jadi, tegangan total rangkaian $V = V_{ab}$ bergantung pada selisih antara V_L dan V_C.

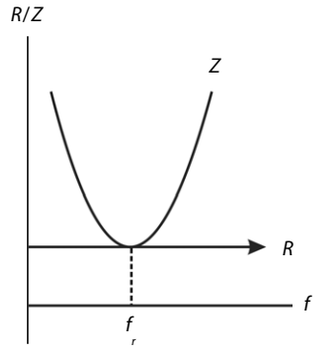
Untuk harga tegangan maksimum besarnya adalah $V_m = V_{Lm} - V_{Cm}$ sehingga akan diperoleh harga hambatan total sebesar
$V_m = V_{Lm} - V_{Cm} \Rightarrow I_m Z = X_L I_m - X_C I_m$,
sehingga

$$Z = X_L - X_C \qquad (6\text{–}64)$$

Arah fasor V merupakan beda sudut fase antara kuat arus I dan tegangan V sebesar φ.
Jika $V_L > V_C$ maka $\varphi = +90°$ dan rangkaian bersifat induktif.
Jika $V_L < V_C$ maka $\varphi = -90°$ dan rangkaian bersifat kapasitif.
Jika $V_L = V_C$ maka $\varphi = 0$, pada kasus ini terjadi peristiwa resonansi.

13. Resonansi pada Rangkaian *R–L–C*

Resonansi dalam rangkaian seri R, L, dan C terjadi ketika $X_L = X_C$. Keadaan ini menyebabkan impedansi rangkaian Z memiliki harga minimum yang bernilai sama dengan hambatan murni R. Adapun arus dalam rangkaian menjadi maksimum. Garis singgung antara kurva Z dan garis linear R merupakan titik terjadinya frekuensi resonansi. Di titik tersebut besaran Z bernilai minimum. Perhatikan **Gambar 6.46,** saat terjadinya resonansi,



Gambar 6.46
Grafik kurva impedansi Z dan grafik linear R.

$$X_L = X_C \Rightarrow \omega_r L = \frac{1}{\omega_r C} \Rightarrow \omega_r^2 r = \frac{1}{LC}$$

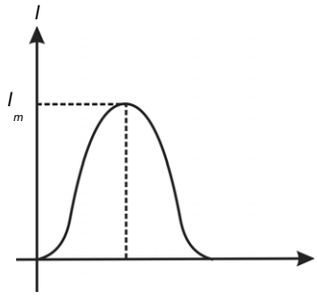
maka

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC}} \qquad (6\text{–}65)$$

Oleh karena $\omega_r = 2\pi f_r$, diperoleh frekuensi resonansi

$$f_r = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}} \qquad (6\text{–}66)$$

Rangkaian resonansi dapat dijumpai pada rangkaian penala, caranya dengan mengubah-ubah frekuensi melalui kondensator variabel. Jika frekuensinya sesuai, frekuensi gelombang radio akan ditangkap.



Gambar 6.47
Ketika frekuensi resonansi terjadi, harga arus mencapai maksimum.

14. Daya pada Arus Listrik Bolak-Balik

Induktor dan kapasitor yang terpasang pada rangkaian arus bolak-balik membutuhkan tambahan energi listrik. Daya yang diserap dalam rangkaian resistif (Z) besarnya adalah

$$P = I_{ef}^2 Z \qquad (6\text{–}67)$$

dan dalam rangkaian R–L–C seri adalah

$$P = I_{ef}^2 \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \qquad (6\text{–}68)$$

Persamaan (6–67) disebut juga sebagai daya semu. Adapun daya yang sesungguhnya atau daya rata-rata adalah

$$P = V_{ef} I_{ef} \cos\varphi \qquad (6\text{–}69)$$

Keterangan:
φ = beda fase antara arus dan tegangan
$\cos\varphi$ = faktor daya

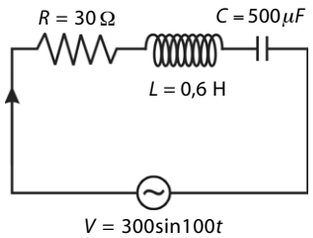
Kata Kunci

- arus bolak-balik
- tegangan bolak-balik
- arus listrik efektif
- tegangan efektif
- osiloskop
- diagram fasor
- voltmeter
- impedansi
- resonansi
- daya

Contoh 6.20

Sebuah rangkaian seri *RLC* dengan $R = 30\,\Omega$, $L = 0{,}6$ H, dan $C = 500\,\mu F$ dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik yang memiliki $V = 300 \sin 100t$ V. Tentukan:

a. impedansi rangkaian;
b. persamaan arus;
c. daya rata-rata yang diserap rangkaian.



Jawab:

a. Impedansi rangkaian dihitung sebagai berikut.

$$X_L = 100\,\text{L} \Rightarrow 100(0{,}6\,\text{H}) = 60\,\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow \frac{1}{100\left(5\times10^{-3}F\right)} = 20\,\Omega \text{ sehingga}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(X_L - X_C\right)^2} \Rightarrow \sqrt{30^2 + (60-20)^2} = 50\Omega$$

b. Persamaan rangkaian arus bolak-balik adalah

$$I_m = \frac{V_m}{Z} = \frac{300\text{ V}}{50\,\Omega} = 6\text{A}$$

Oleh karena $X_L > X_C$, rangkaian lebih bersifat induktif atau tegangan akan mendahului arus, dengan beda sudut fase φ.

$$\tan\varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{60-20}{30} = \frac{4}{3} \Rightarrow \varphi = 53° = \frac{53}{180}\pi \text{ rad}$$

$$I = I_m \sin(\omega t - \varphi) = 6\sin(100t - 0{,}3\pi)$$

c. Daya rata-rata yang diserap rangkaian adalah

$$\tan\varphi = \frac{4}{3}, \text{ maka } \cos\varphi = \frac{3}{5} = 0{,}6$$

$$P = V_{ef}\, I_{ef} \cos\varphi = \frac{V_m}{\sqrt{2}}\frac{i_m}{\sqrt{2}}\cos\varphi$$

$$P = \frac{300}{\sqrt{2}}\frac{6}{\sqrt{2}}(0{,}6) = 540\text{ W}$$

Tes Kompetensi Subbab C

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Jelaskan apa yang dimaksud dengan:
 a. harga efektif kuat arus dan tegangan bolak-balik;
 b. harga maksimum kuat arus dan tegangan bolak-balik;
 c. harga kuat arus dan tegangan bolak-balik rata-rata.
2. Sumber tegangan arus bolak-balik besarnya 100 V. Sebuah setrika listrik dengan hambatan $20\,\Omega$ dihubungkan ke sumber tegangan tersebut. Hitunglah nilai efektif, nilai maksimum, dan nilai rata-rata untuk
 a. tegangan sumber;
 b. arus yang mengalir.

3. Rangkaian *R–L* seri dihubungkan ke sumber tegangan bolak-balik $V_m = 100$ V dengan hambatan murni $R = 90\ \Omega$. Jika arus maksimum yang mengalir melalui rangkaian adalah 2 A, tentukanlah:
 a. impedansi rangkaian;
 b. reaktansi induktor;
 c. tegangan antara ujung-ujung induktor.
4. Sebuah kumparan dengan induktansi 0,075 H dan hambatan murni $10\ \Omega$ dihubungkan ke sumber tegangan 220 V, $\frac{100}{\pi}$ Hz. Hitunglah:
 a. arus yang melalui rangkaian;
 b. sudut fase kuat arus *I* terhadap tegangan *V*;
 c. persamaan kuat arus *I*, jika tegangan sumber $V = V_m \sin \omega t$;
 d. arus yang melalui rangkaian saat $t = 6 \times 10^{-3}$ s.
5. Sebuah resistor $R = 30\ \Omega$ dan kapasitor C = 250 μF dipasang seri pada sebuah rangkaian tegangan bolak-balik, arus yang mengalir dengan persamaan $I = (4 \sin 100t)$ A. Tentukan persamaan tegangan pada rangkaian tersebut.
6. Sebuah rangkaian arus AC memiliki resistor $40\ \Omega$ dipasang pada tegangan 58 V efektif; $\frac{200}{\pi}$, Hz dan dirangkai seri dengan kapasitor sebesar 2,5 μF. Hitunglah:
 a. impedansi rangkaian;
 b. tegangan maksimum antara ujung-ujung resistor.
7. Sebuah sumber tegangan AC 120 V dihubungkan pada induktor murni yang induktansinya 0,75 H. Tentukan arus yang mengalir pada induktor, jika frekuensi sumber:
 a. 60 Hz;
 b. 60 kHz.
8. Dalam suatu rangkaian seri *R*–C mengalir arus 3A dengan $R = 100\ \Omega$ dan reaktansi kapasitif $250\ \Omega$. Hitunglah V_R, V_C, dan *V*, dan Z.
9. Rangkaian seri terdiri atas hambatan $800\ \Omega$, memiliki induktansi 0,40 H dengan hambatan induktansi dapat diabaikan, dan kapasitor 120 μF. Rangkaian dihubungkan pada sumber tegangan 210 V, 160 Hz. Hitunglah:
 a. X_L, X_C, Z, dan *I*;
 b. daya yang hilang;
 c. sudut fase antara tegangan dan kuat arus;
 d. penunjukan voltmeter pada V_R, V_C, V_L, dan *V*.
10. Tentukan frekuensi resonansi rangkaian induktansi 40 mH dan kapasitansi 600 μF, dengan resistansi yang dapat diabaikan.

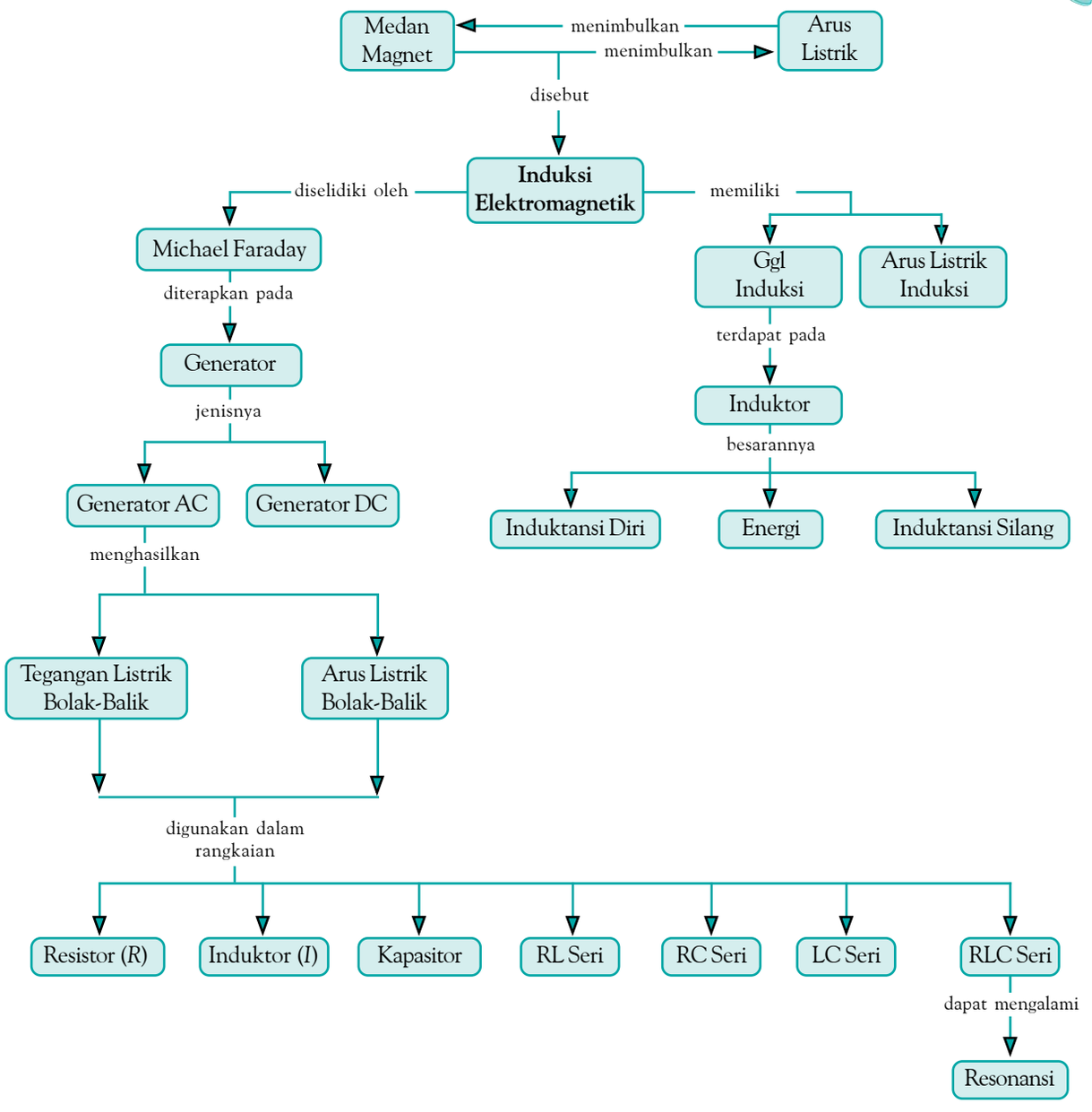
Rangkuman

1. Induksi elektromagnetik adalah gejala timbulnya arus listrik dari medan magnet. Besarnya induksi elektromagnetik bergantung pada faktor-faktor sebagai berikut.
 a. Laju perubahan fluks medan magnet dalam kumparan.
 b. Jumlah lilitan kumparan.
2. Ggl induksi atau arus induksi dapat terjadi akibat:
 a. perubahan kuat medan magnetik;
 b. perubahan luas bidang kumparan yang ditembus oleh medan magnetik.

 Secara matematis besarnya ggl induksi adalah
 $$\varepsilon = B\ell v\sin\theta$$
 dengan θ, sudut antara B dan bidang kumparan.
3. Pada induktor, perubahan arus dalam kumparan dapat menimbulkan ggl induksi. Secara matematis, besarnya ggl induksi adalah
 $$\varepsilon = L\frac{\Delta I}{\Delta t} = L\left[\frac{I_2 - I_1}{t_2 - t_1}\right]$$
4. Energi yang tersimpan dalam induktor adalah
 $$W = \frac{1}{2}LI^2$$
5. Rapat energi atau energi per satuan volume adalah
 $$U = \frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0}$$
 dengan V adalah volume solenoida atau toroida.
6. Induktansi silang terjadi pada dua kumparan yang memiliki inti kumparan bersambung. Besarnya ggl induksi yang timbul pada kumparan sekunder karena pengaruh perubahan fluks magnetik dalam waktu dt memenuhi persamaan:
 $$\varepsilon_2 = -N_2\frac{d\Phi_1}{dt} = -M\frac{dI_1}{dt}$$
 $$\varepsilon_1 = -N_1\frac{d\Phi_2}{dt} = -M\frac{dI_2}{dt}$$
7. Aplikasi induksi elektromagnetik di antaranya diterapkan pada generator dan trafo.
8. Arus listrik dan ggl sebanding dengan nilai maksimumnya.
 $V = V_m\sin\omega t$ atau $V = V_m\sin 2\pi ft$
 $I = I_m\sin\omega t$ atau $I = I_m\sin 2\pi ft$

 Pada grafik fasor, tegangan dan kuat arus memiliki beda fase $\varphi = \pi$, sehingga persamaan menjadi
 $V = V_m\sin(\omega t + \pi)$ dan $I = I_m\sin\omega t$
9. Pada rangkaian arus bolak-balik, jika arus $I = I_m\sin\omega t$ bentuk persamaan tegangan V untuk:
 a. resistor (R), $V =$ $V = V_m\sin\omega t$;
 b. induktor (L), $V = V_m\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ karena mendahului I sebesar $\frac{\pi}{2}$ rad;
 c. kapasitor (C), $V = V_m\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$ karena tertinggal I sebesar $\frac{\pi}{2}$ rad.
10. Dalam rangkaian arus AC impedansi untuk rangkaian:
 a. R dan L dipasang seri adalah $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$
 b. R dan C dipasang seri adalah $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$
 c. L dan C dipasang seri adalah $Z = X_L - X_C$
 d. R, L, dan C dipasang seri adalah
 $$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$
 atau
 $$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$
11. Resonansi dalam rangkaian seri R, L, dan C terjadi ketika $X_L = X_C$. Keadaan ini menyebabkan impedansi rangkaian Z memiliki harga minimum yang bernilai sama dengan hambatan murni R. Secara matematis, frekuensi resonansi ditulis sebagai berikut.
 $$f_r = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}}$$
12. Daya yang diserap rangkaian induktor dan kapasitor (rangkaian resistif Z) yang terpasang arus bolak-balik adalah
 $$P = I_{ef}^2 Z \text{ atau } P = I_{ef}^2\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$
 Adapun daya rata-ratanya adalah
 $$P = V_{ef}I_{ef}\cos\varphi$$

Peta Konsep



Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, Anda tentu dapat memahami konsep induksi elektromagnetik yang dapat menghasilkan arus induksi dan ggl induksi. Anda juga tentu memahami rangkaian impedansi dalam arus bolak-balik. Dari keseluruhan materi pada bab ini, bagian mana yang menurut Anda sulit dipahami? Coba Anda diskusikan bersama teman atau guru Fisika Anda.

Penala pada radio merupakan pemanfaatan rangkaian impedansi. Coba Anda cari manfaat atau aplikasi konsep Fisika yang ada pada bab ini dan coba Anda diskusikan cara kerjanya bersama teman Anda.

Tes Kompetensi Bab 6

Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan.

1. Pernyataan berikut yang tidak benar ketika sebuah magnet mendekati kumparan adalah
 a. ggl induksi muncul pada ujung-ujung kumparan
 b. ggl induksi akan lebih besar jika magnet digerakkan lebih cepat
 c. energi mekanik berubah menjadi energi listrik
 d. efek yang dihasilkan dinamakan induksi listrik statis
 e. efek yang dihasilkan dinamakan induksi elektromagnetik
2. Perubahan jumlah garis gaya magnetik dalam suatu kumparan menimbulkan arus induksi.
 Hal tersebut ditemukan oleh
 a. Hans Christian Oersted
 b. Michael Faraday
 c. Andre Marie Ampere
 d. James Clerk Maxwell
 e. Lorentz
3. Besarnya ggl induksi yang terjadi pada kumparan tidak dipengaruhi oleh
 a. kuat medan magnetik
 b. banyaknya lilitan
 c. laju perubahan fluks magnetik
 d. hambatan kumparan
 e. perubahan luas bidang kumparan
4. Ggl induksi yang dihasilkan pada kawat karena gerakannya memotong medan magnetik tidak bergantung pada
 a. panjang kawat
 b. diameter kawat
 c. rapat fluks medan magnetik
 d. orientasi kawat
 e. kelajuan kawat
5. Sebuah magnet batang dilewatkan menembus sebuah kumparan. Arus induksi paling besar terjadi jika
 a. magnet bergerak lambat sehingga ia berada cukup lama di dalam kumparan
 b. magnet bergerak cepat sehingga ia berada sebentar di dalam kumparan
 c. magnet dimasukkan sejajar dengan permukaan bidang
 d. kutub selatan magnet masuk lebih dahulu
 e. kutub utara magnet masuk lebih dahulu
6. Fluks magnetik yang menembus sebuah loop kawat yang berada di dalam medan magnetik B tidak bergantung pada
 a. luas loop
 b. rapat fluks
 c. sudut antara bidang loop dan arah B
 d. besarnya B
 e. bentuk loop
7. Satuan fluks magnetik adalah Wb, 1 Wb = ...
 a. $1\ \text{Tm}^2$
 b. $1\ \text{T/m}^2$
 c. $1\ \text{Am}^2$
 d. $1\ \text{A/m}^2$
 e. 1 Tm
8. Sebuah loop kawat digerakkan sejajar medan magnetik homogen. Ggl yang diinduksikan pada loop adalah
 a. bergantung pada luas loop
 b. bergantung pada bentuk loop
 c. bergantung pada besarnya medan
 d. bergantung pada laju gerak loop
 e. nol
9. Suatu kumparan dengan 600 lilitan dan induktansi diri 40 mH mengalami perubahan arus listrik dari 10 ampere menjadi 4 ampere dalam waktu 0,1 detik. Beda potensial antara ujung-ujung kumparan yang diakibatkannya adalah
 a. 1,8 volt
 b. 2,4 volt
 c. 4,8 volt
 d. 10,8 volt
 e. 14,4 volt
10. Kuat arus listrik dalam suatu rangkaian tiba-tiba turun dari 10 A menjadi 2 A dalam waktu 0,1 detik. Selama peristiwa ini, timbul ggl induksi sebesar 32 V dalam rangkaian. Besar induktansi rangkaiannya adalah
 a. 0,32 H
 b. 0,40 H
 c. 2,5 H
 d. 32 H
 e. 40 H
11. Prinsip kerja sebuah generator arus bolak-balik berdasarkan Hukum
 a. Biot-Savart
 b. Ampere
 c. Faraday
 d. Henry
 e. Coulomb
12. Untuk menaikkan ggl induksi suatu generator dapat dilakukan dengan cara
 a. memperbesar kecepatan anguler gerak kumparan
 b. mengurangi jumlah lilitan kumparan
 c. memperkecil kuat medan dan medan magnetik
 d. menambah panjang generator
 e. mengurangi jumlah lilitan kumparan
13. Perbandingan jumlah lilitan sekunder dan lilitan primer sebuah trafo adalah 3 : 1. Jika tegangan primernya 220 V, tegangan sekundernya adalah
 a. 6.600 V
 b. 660 V
 c. 35 V
 d. 350 V
 e. 66 V
14. Jumlah lilitan primer pada trafo 400 lilitan. Jika tegangan primer pada trafo tersebut 12 V dan tegangan sekundernya 240 V, banyaknya lilitan pada kumparan sekunder adalah
 a. 40 lilitan
 b. 200 lilitan
 c. 4.000 lilitan
 d. 8.000 lilitan
 e. 6.000 lilitan

15. Sebuah trafo mengeluarkan arus 10 A pada 24 V. Jika tegangan primernya 120 Vdengan kuat arus 4 A, efisiensi trafo tersebut adalah
 a. 30%
 b. 40%
 c. 50%
 d. 60%
 e. 70%
16. Perbandingan antara arus primer dan arus sekunder pada trafo tidak bergantung pada
 a. perbandingan lilitan dari kedua kumparan
 b. hambatan kumparan
 c. sifat inti kumparan
 d. tegangan primer
 e. tegangan sekunder
17. Kumparan primer sebuah transformator memiliki 200 lilitan dan kumparan sekundernya 50 lilitan. Jika arus sekunder 40 A, arus primernya
 a. 10 A
 b. 80 A
 c. 100 A
 d. 160 A
 e. 8 kA
18. Sebuah lampu 60 W; 24 V ingin dinyalakan pada tegangan bolak-balik 120 V. Kombinasi lilitan dari trafo yang diperlukan adalah
 a. 20 lilitan primer, 100 lilitan sekunder
 b. 50 lilitan primer, 100 lilitan sekunder
 c. 100 lilitan primer, 20 lilitan sekunder
 d. 100 lilitan primer, 50 lilitan sekunder
 e. 100 lilitan primer, 100 lilitan sekunder
19. Sebuah trafo mengubah tegangan 25 V menjadi 250 V. Jika efisiensi trafo itu 80% dan kumparan sekundernya dihubungkan dengan lampu 250 V, 50 W, kuat arus dalam kumparan primer adalah
 a. 5,8 A
 b. 2,5 A
 c. 1,5 A
 d. 1,0 A
 e. 0,5 A
20. Sebuah transformator memiliki efisiensi 75%. Tegangan primernya 240 V dan arus primernya 1 A. Daya sekunder setelah diberi beban adalah
 a. 60 W
 b. 180 W
 c. 220 W
 d. 230 W
 e. 240 W

B. Jawablah pertanyaan berikut ini dengan tepat.

1. Jelaskan kesimpulan dari percobaan Faraday.
2. Bagaimana hubungan antara hasil penemuan **Oersted** dan hasil penemuan **Faraday**?
3. Jelaskan prinsip kerja dinamo arus bolak-balik dan arus searah.
4. Sebuah transformator yang dipasang pada lemari es dihubungkan dengan sumber dari PLN sebesar 220 V. Jika tegangan dan arus yang dibutuhkan oleh lemari es sebesar 24 V dan 0,6 A, hitunglah:
 a. jumlah lilitan sekundernya, jika jumlah lilitan primer 2.000 lilitan;
 b. arus primer pada transformator;
 c. daya primernya jika efisiensi (η) = 55%.
5. Sebuah transformator dihubungkan dengan sumber tegangan PLN 110 V dan kuat arusnya 2 mA. Ternyata tegangan keluarannya sebesar 12 V dan kuat arusnya 4 mA. Hitunglah:
 a. efisiensi transformator;
 b. perbandingan jumlah lilitan primer dan lilitan sekunder.
6. Sebuah transformator yang dipasang pada pesawat radio memerlukan beda potensial 24 V. Terminal primernya dihubungkan dengan sumber tegangan PLN 240 V. Jika jumlah lilitan sekunder transformator tersebut 720 lilitan dan arus yang mengalir dalam pesawat radio 8 mA, tentukan:
 a. jumlah lilitan primer;
 b. kuat arus pada kumparan primer;
 c. daya primernya jika efisiensi transformator 75%.
7. Ketika tegangan 220 V dihubungkan dengan kumparan primer suatu transformator, arus 0,4 A mengalir pada kumparan tersebut. Ternyata pada kumparan sekunder mengalir arus 4 A. Jika daya yang hilang menjadi panas sebesar 6 W, tentukan:
 a. daya primer;
 b. jumlah lilitan sekunder jika lilitan primernya 1.200 lilitan;
 c. efisiensi transformator.
8. Hitung jumlah lilitan sekunder sebuah transformator step-down yang memungkinkan sebuah lampu pijar 6 V dapat dipakai pada tegangan 240 V, jika dalam kumparan primer terdapat 720 lilitan.
9. Sebuah transformator step down bekerja pada jaringan 2,5 kV dan dapat memberi arus 80 A. Perbandingan lilitan pada kumparan primer dan sekunder adalah 20 : 1. Dengan mengandaikan efisiensi 100%, berapakah tegangan sekunder, arus primer, dan daya yang dihasilkan?
10. Apakah keuntungannya mentransmisikan daya listrik dengan menggunakan tegangan tinggi? Jelaskan.

Proyek Semester 1

Pada semester ganjil ini Anda telah mempelajari Bab 6 tentang Induksi Elektromagnetik. Anda tahu bahwa arus listrik dapat dihasilkan dari medan magnet dan kawat melalui proses induksi. Untuk lebih memahami konsep tersebut, Anda akan ditugaskan untuk melakukan kegiatan semester secara berkelompok bersama teman Anda. Tugas yang harus dilakukan adalah membuat generator listrik sederhana.

Dalam satu kelas dibagi menjadi dua kelompok. Kelompok pertama mengerjakan pembuatan generator yang menghasilkan arus searah (DC) dan kelompok kedua mengerjakan pembuatan generator yang menghasilkan arus bolak-balik (AC). Untuk mengarahkan pekerjaan Anda, dituliskan pula langkah-langkah pengerjaan tugas proyek.

Di akhir pekerjaan, Anda bersama teman sekelompok harus menyusun laporan kegiatan yang berisikan: Judul; Tujuan; Alat dan Bahan; Dasar teori tentang generator dan jenis arus yang dihasilkan; Prosedur percobaan; Analisis rangkaian; Kesimpulan; dan Saran. Kemudian, laporan tersebut dipresentasikan dihadapan kelompok lain dan guru Fisika Anda.

Generator Listrik Sederhana

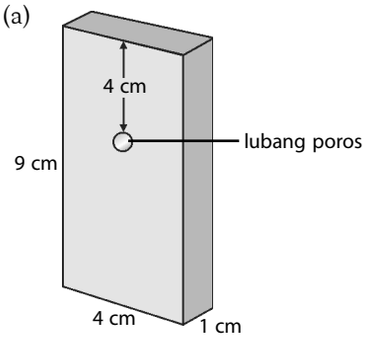
Tujuan Kegiatan

Membuat generator listrik sederhana yang dapat menghasilkan arus AC atau DC.

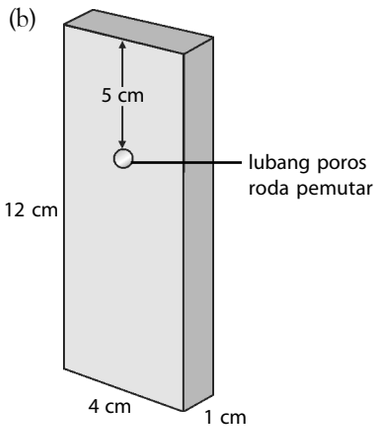
Alat dan Bahan

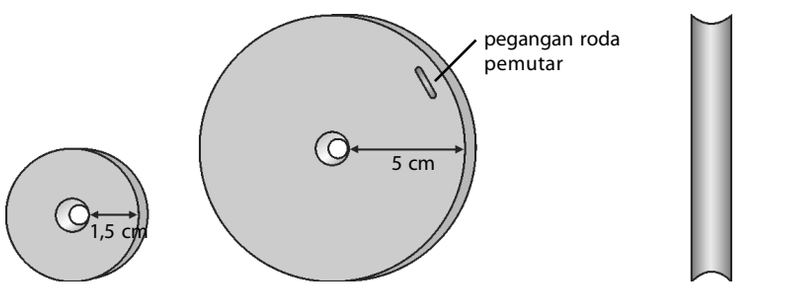
1. Kawat email (diameter 1 mm) secukupnya
2. Magnet batang ($p = 5$ cm; $\ell = 30$ cm; $t = 9$ cm) dua buah (penggunaan magnet ini bisa diganti dengan magnet bekas *loudspeaker*)
3. Papan landasan ($p = 20$ cm; $\ell = 20$ cm; $t = 1$ cm)
4. Papan tiang poros ($p = 4$ cm; $\ell = 1$ cm; $t = 9$ cm) dua buah. Perhatikan gambar (a) di samping.
5. Papan tiang roda pemutar ($p = 4$ cm; $\ell = 1$ cm; $t = 12$ cm) satu buah. Perhatikan gambar (b) di samping.
6. Roda. Perhatikan gambar berikut.

(a)



(b)



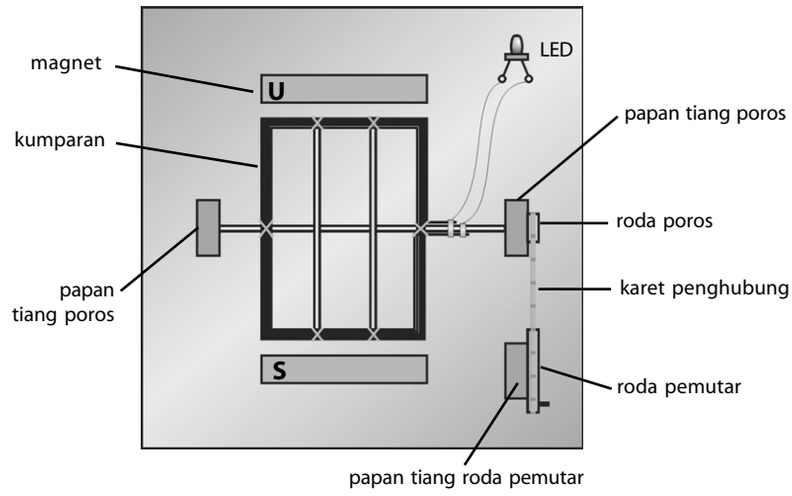


roda poros | roda pemutar | roda tampak muka

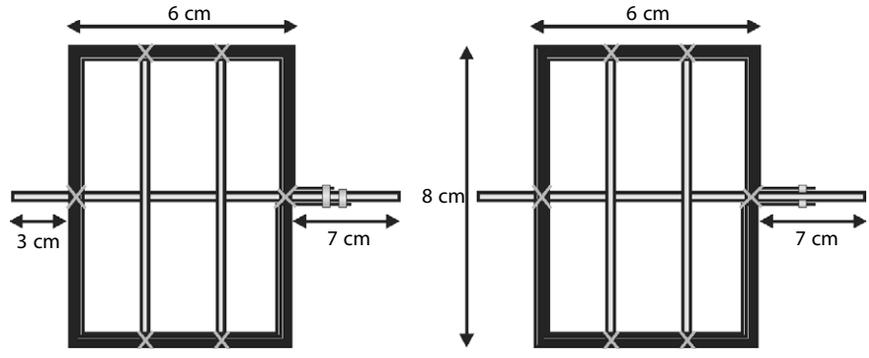
7. Karet penghubung (ukuran disesuaikan)
8. Plat tembaga yang dibentuk cincin secukupnya
9. Kabel secukupnya
10. Lampu LED 0,5 watt

Prosedur Percobaan

1. Perhatikan skema alat tampak atas berikut dengan teliti.

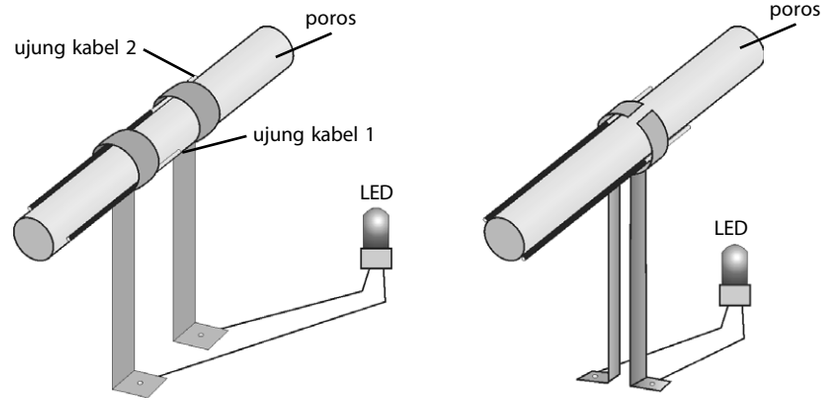


2. Buat kumparan dari 10 lilitan kawat email dengan ukuran sebagai berikut.



Agar kumparan kokoh menempel pada poros, gunakan pengikat kawat.

3. Rangkaikan peralatan seperti pada skema. Posisi setiap alat disesuaikan dengan tempat yang ada pada papan landasan.
4. Perhatikan pemasangan cincin pada kumparan berikut.



Arus AC Arus DC

5. Setelah rangkaian selesai, coba Anda putar roda pemutar.
 a. Untuk generator AC, jika lampu LED ditukar posisi kakinya maka LED tetap akan menyala.
 b. Untuk generator DC, jika lampu LED ditukar posisi kakinya maka ada posisi yang menyebabkan LED mati.

Tes Kompetensi Fisika
Semester 1

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan.

1. Gelombang longitudinal tidak menunjukkan peristiwa
 a. pembiasan
 b. pemantulan
 c. difraksi
 d. dispersi
 e. polarisasi
2. Gelombang bunyi dengan frekuensi 3 kHz merambat dalam air dengan kelajuan 1.500 m/s, panjang gelombang bunyi tersebut adalah
 a. 0,05 m
 b. 0,010 m
 c. 0,25 m
 d. 0,5 m
 e. 1,0 m
3. Pada suatu saat terlihat kilat dan 5 detik kemudian terdengar gunturnya. Jika kecepatan cahaya besarnya 3×10^8 m/s dan kecepatan bunyi = 340 m/s, jarak antara tempat asal kilat dan pengamat adalah
 a. 17 m
 b. 1.700 m
 c. 3.400 m
 d. 3×10^8 m
 e. 15×10^8 m
4. Gelombang bunyi dengan frekuensi 256 Hz merambat di udara dengan kecepatan 330 m/s. Kecepatan rambat gelombang bunyi dengan frekuensi 556 Hz di udara adalah
 a. 82,5 m/s
 b. 165 m/s
 c. 330 m/s
 d. 660 m/s
 e. 1.320 m/s
5. Suatu sumber bunyi bergerak relatif terhadap pendengar yang diam dengan kecepatan 25 m/s. Jika cepat rambat bunyi di udara = 325 m/s maka perbandingan frekuensi yang diterima pendengar itu pada saat sumber bunyi mendekati dan menjauhi adalah
 a. 5 : 6
 b. 6 : 7
 c. 7 : 6
 d. 6 : 5
 e. 5 : 4
6. Sebuah sumber bunyi dengan frekuensi 1.024 Hz bergerak mendekati pendengar dengan kecepatan 34 m/s. Kecepatan rambat bunyi di udara = 340 m/s. Jika pendengar menjauhi sumber dengan kecepatan 17 m/s, frekuensi bunyi yang diterima pendengar sama dengan
 a. 920 Hz
 b. 1.080 Hz
 c. 1.120 Hz
 d. 1.220 Hz
 e. 1.320 Hz
7. Simaklah pernyataan-pernyataan berikut ini.
 (1) Dapat mengalami polarisasi.
 (2) Merupakan gelombang transversal.
 (3) Merambat lurus dalam medan magnet dan medan listrik
 (4) Terdiri atas partikel-partikel bermuatan listrik.

 Pernyataan yang benar mengenai sifat gelombang elektromagnetik adalah
 a. (1), (2), dan (3)
 b. (1), (2), (3), dan (4)
 c. (1) dan (3)
 d. (2) dan (4)
 e. (3) saja
8. Suatu rangkaian penala dari radio penerima memiliki induktansi = $3{,}00 \times 10^{-7}$ H. Untuk menangkap siaran pendidikan dari radio mitra pelajar, kapasitor variabel dari rangkaian penala harus diatur pada nilai 120 pF. Panjang gelombang yang dipancarkan radio tersebut adalah
 a. 11,3 m
 b. 18,5 m
 c. 22,1 m
 d. 25,2 m
 e. 314 m
9. Sudut pita terang tengah dari difraksi orde kedua yang dihasilkan oleh kisi dengan 6.250 celah/cm sebesar 60°, maka panjang gelombang cahaya yang dipergunakan adalah
 a. 4.000 Å
 b. $4.000\sqrt{3}$ Å
 c. 5.000 Å
 d. $5.000\sqrt{3}$ Å
 e. 6.250 Å
10. Pada percobaan Young (celah ganda), jika jarak antara dua celahnya dijadikan dua kali semula, jarak antara dua garis gelap yang berurutan
 a. 4 kali semula
 b. 2 kali semula
 c. $\frac{1}{4}$ kali semula
 d. $\frac{1}{2}$ kali semula
 e. tetap tidak berubah
11. Dua celah sempit yang terpisah pada jarak 0,2 mm disinari tegak lurus. Garis terang ketiga terletak 7,5 mm dari garis terang ke nol pada layar yang jaraknya 1 m dari celah. Panjang gelombang sinar yang dipakai adalah
 a. $2{,}5 \times 10^{-4}$ mm
 b. $5{,}0 \times 10^{-4}$ mm
 c. $1{,}5 \times 10^{-4}$ mm
 d. $2{,}5 \times 10^{-3}$ mm
 e. $5{,}0 \times 10^{-3}$ mm
12. Seberkas sinar monokromatik dengan panjang gelombang 5×10^{-7} m datang tegak lurus pada kisi. Jika spektrum orde kedua membuat sudut 30° dengan garis normal pada kisi, jumlah garis per cm kisi adalah
 a. 2×10^3 buah
 b. 4×10^3 buah
 c. 5×10^3 buah
 d. 2×10^4 buah
 e. 5×10^4 buah

13. Pada suatu saat terlihat kilat dan 10 s kemudian terdengar suara gunturnya. Jika kecepatan cahaya besarnya 3×10^8 m/s dan kecepatan bunyi = 340 m/s, jarak antara tempat asal kilat dan pengamat adalah
 a. 34 m
 b. 3.400 m
 c. 10.200 m
 d. 3×10^8 m
 e. 3×10^9 m

14. Sebuah alat sonar digunakan untuk mengukur kedalaman laut. Selang waktu yang dicatat oleh sonar untuk gelombang merambat hingga kembali lagi ke sonar adalah 1 s. Jika cepat rambat gelombang di dalam air laut adalah 1.500 m/s, kedalaman air laut adalah
 a. 500 m
 b. 750 m
 c. 1.000 m
 d. 1.250 m
 e. 1.500 m

15. Sebuah sumber bunyi bergerak dengan kecepatan a m/s menuju ke pendengar yang diam, sehingga frekuensi yang didengar oleh pendengar adalah f_1. Jika sumber bunyi itu diam, sedangkan pendengar bergerak dengan kecepatan a m/s mendekati sumber bunyi, frekuensi yang didengar oleh pendengar adalah f_2. Jika cepat rambat bunyi di udara v m/s, perbandingan $f_2 : f_1$ adalah
 a. 1
 b. $1 - \frac{a}{v}$
 c. $1 + \frac{a}{v}$
 d. $1 - \frac{a^2}{v^2}$
 e. $1 + \frac{a^2}{v^2}$

16. Jika dua buah sumber bunyi masing-masing dengan frekuensi 2.000 Hz dan 2.008 Hz berbunyi dengan serentak, maka akan timbul pelayangan bunyi dengan frekuensi
 a. 2 Hz
 b. 4 Hz
 c. 8 Hz
 d. 2.004 Hz
 e. 2.008 Hz

17. Dua buah dawai baja yang identik memberikan nada dasar dengan frekuensi 400 Hz. Jika tegangan dalam salah satu dawai ditambah dengan 2%, berapa frekuensi pelayangan yang terjadi?
 a. 0 Hz
 b. 2 Hz
 c. 4 Hz
 d. 6 Hz
 e. 8 Hz

18. Tabung menghasilkan resonansi pertama pada $\ell = 40$ cm. Jika panjang kawat 120 cm bergetar pada nada atas kedua dan cepat rambat bunyi di udara = 340 m/s, cepat rambat gelombang transversal dalam kawat adalah
 a. 127,5 m/s
 b. 170 m/s
 c. 340 m/s
 d. 225 m/s
 e. 85 m/s

19. Satuan kuat medan listrik dinyatakan dalam:
 (1) newton/coulomb
 (2) joule/detik
 (3) volt/meter
 (4) coulomb/volt
 Satuan yang benar adalah
 a. (1) dan (3)
 b. (2) dan (4)
 c. (1), (2), dan (3)
 d. (4) saja
 e. semua benar

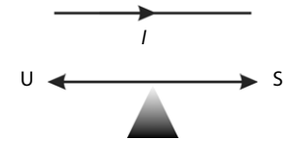
20. Untuk memindahkan muatan 10 C dari satu titik yang potensialnya 10 V ke suatu titik lain dengan beda potensial 60 V diperlukan usaha sebesar
 a. 5 joule
 b. 100 joule
 c. 500 joule
 d. 550 joule
 e. 600 joule

21. Suatu muatan sebesar 5×10^{-9} C terletak dalam sebuah ruang. Suatu titik terletak 30 cm dari muatan itu. Besar kuat medan di titik itu adalah
 a. 750 N/C menuju muatan
 b. 700 N/C meninggalkan muatan
 c. 600 N/C menuju muatan
 d. 500 N/C menuju muatan
 e. 500 N/C meninggalkan muatan

22. Dua buah elektron dengan $e = 1{,}6 \times 10^{-9}$ C dan $m = 9{,}1 \times 10^{-31}$ kg dilepaskan dari keadaan diam pada saat keduanya berjarak 2×10^{-14} m. Kecepatan elektron ketika keduanya berjarak 5×10^{-14} m adalah
 a. $0{,}02 \times 10^8$ m/s
 b. $0{,}2 \times 10^8$ m/s
 c. $0{,}3 \times 10^8$ m/s
 d. $0{,}5 \times 10^8$ m/s
 e. $0{,}87 \times 10^8$ m/s

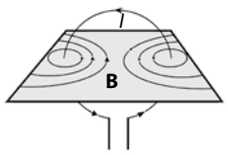
23. Tiga buah kapasitor yang masing-masing kapasitasnya 3 F, 6 F, dan 4 F dihubungkan secara seri. Kedua ujung dari gabungan tersebut dihubungkan dengan sumber tegangan yang besarnya 120 V. Tegangan antara ujung-ujung kapasitor 4 F adalah
 a. 40 V
 b. 60 V
 c. 220 V
 d. 120 V
 e. 240 V

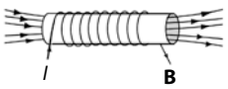
24. Sebuah kompas magnetik ditempatkan di bawah kawat berarus I dan sejajar terhadap kawat seperti tampak pada gambar berikut.

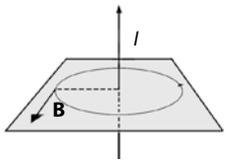


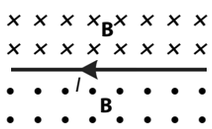
 Kutub selatan magnet akan
 a. bergerak ke atas
 b. bergerak ke bawah
 c. berputar ke luar bidang kertas
 d. berputar ke dalam bidang kertas
 e. bergerak ke dalam

25. Perhatikan gambar-gambar medan magnetik B dan penghantar berarus I berikut.

(1) 

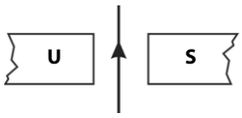
(2) 

(3) 

(4) 

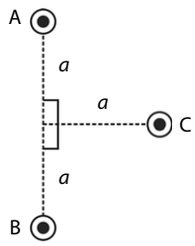
Gambar-gambar yang memperlihatkan arah B yang ditimbulkan oleh I adalah
a. (1), (2), dan (3)
b. (1) dan (3)
c. (4)
d. (1), (2), (3), dan (4)
e. (2) dan (4)

26. Perhatikan gambar berikut.



Di antara dua buah kutub magnet U dan S ditempatkan sebuah kawat berarus listrik I. Kawat tersebut akan mendapat gaya Lorentz yang arahnya
a. masuk ke bidang kertas
b. ke luar dari bidang kertas
c. ke atas
d. ke bawah
e. ke utara

27. Kawat A, B, dan C seperti pada gambar berikut.



Masing-masing dialiri oleh arus-arus listrik yang sama besar dengan arah keluar dari bidang gambar (perhatikan tanda ⊙). Besar gaya per satuan panjang yang dialami oleh kawat C adalah

a. $\frac{\mu_0 I^2}{2a}\sqrt{3}$
b. $\frac{\mu_0 I^2}{2a}\sqrt{2}$
c. $\frac{2\mu_0 I^2}{\pi a}$
d. $\frac{\mu_0 I^2}{\pi a}$
e. $\frac{\mu_0 I^2}{2\pi a}$

28. Solenoida dengan panjang 25 cm terdiri atas 800 lilitan. Jika pada solenoida dialiri arus 2 A, induksi magnetik yang terjadi pada pusat solenoida tersebut adalah
a. $2{,}56\pi \times 10^{-3}$ Wb/m^2
b. $5{,}12\pi \times 10^{-3}$ Wb/m^2
c. $6{,}64\pi \times 10^{-3}$ Wb/m^2
d. $7{,}68\pi \times 10^{-3}$ Wb/m^2
e. $8{,}46\pi \times 10^{-3}$ Wb/m^2

29. Suatu kumparan panjangnya 40 cm, dialiri arus listrik 5 A. Dalam kumparan diisi bahan yang memiliki permeabilitas relatif 300. Ternyata, induksi magnetik di ujung-ujung kumparan $1{,}5\pi$ T. Banyaknya lilitan kumparan tersebut adalah
a. 50 lilitan
b. 200 lilitan
c. 500 lilitan
d. 2.000 lilitan
e. 5.000 lilitan

30. Solenoida dengan panjang b dan toroida yang berjari-jari a memiliki jumlah lilitan yang sama dan dialiri oleh arus yang sama besar. Perbandingan antara induksi magnetik di pusat solenoida dan toroida adalah
a. $a : b$
b. $a : \pi b$
c. $\pi a : b$
d. $2\pi a : b$
e. $1 : 1$

31. Jika induktansi timbal-balik kumparan sekunder 0,01 H dan pada primernya terjadi perubahan arus listrik sebesar 5 A dalam selang waktu 1 s. Besarnya ggl induksi pada kumparan sekunder adalah
a. 0,5 V
b. 1,5 V
c. 2,5 V
d. 5 V
e. 50 V

32. Pada sebuah kumparan dengan tegangan primer 120 V dan terjadi perubahan arus listrik sebesar 1 A dalam waktu 0,1 s. Pada sekundernya juga terjadi perubahan arus listrik sebesar 2 A dalam waktu 1 s. Besarnya ggl pada sekundernya adalah
a. 12 V
b. 24 V
c. 60 V
d. 120 V
e. 240 V

33. Sebuah induktor memiliki induktansi 0,05 H. Pada induktor tersebut mengalir arus listrik sebesar 10 A. Besarnya energi listrik pada induktor tersebut adalah
a. 0,25 J
b. 0,50 J
c. 2,50 J
d. 5,00 J
e. 25,0 J

34. Sebuah kumparan dengan induktansi 0,25 H dialiri arus yang berubah-ubah terhadap waktu sesuai dengan persamaan $I = 8 - 6t^2$ A dengan t dalam s. Ggl induktansi diri sebesar 12 V timbul pada saat t sama dengan
a. 1 s
b. 2 s
c. 3 s
d. 4 s
e. 5 s

35. Mesin yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik adalah
a. turbin
b. motor
c. generator
d. transformator
e. galvanometer

B. Jawablah pertanyaan berikut ini dengan tepat.

1. Sebuah kereta api bergerak dengan kecepatan 30 m/s mendekati stasiun. Peluit kereta api berfrekuensi 2.000 Hz dibunyikan. Kecepatan bunyi di udara 340 m/s. Tentukan frekuensi yang didengar oleh orang yang berada di stasiun.
2. Suatu lapisan di atas air memantulkan cahaya merah. Ini berarti cahaya biru mengalami interferensi minimum dan hilang dari spektrum. Jika indeks bias minyak = 1,5, sedangkan panjang gelombang sinar biru = 5×10^{-7} m, tentukanlah tebal lapisan minyak minimum.
3. Pada percobaan Young digunakan sinar dengan panjang gelombang 600 mm, jarak layar dengan sumber 80 cm, sedangkan jarak garis gelap terdekat ke pusat pola interferensi (gelap pertama) 2.800 mm. Hitunglah jarak antara dua celah sumber cahaya.
4. Hitung besar induksi magnetik pada suatu titik yang berjarak 200 cm dari suatu penghantar lurus sangat panjang yang berarus 4,0 A.
5. Berapa banyak lilitan dengan suatu kumparan melingkar datar dengan jari-jari 10 cm sehingga arus 10 A yang melalui kumparan menghasilkan induksi magnet sebesar $3{,}14 \times 10^{-3}$ T di pusatnya?
6. Sebuah kawat melingkar yang berarus 2 A, jari-jari $r = 8$ cm terletak di permukaan meja. Pada kawat tersebut bekerja medan magnet sebesar 0,065 T dengan arah vertikal ke bawah. Tentukan:
 a. gaya total pada kawat karena medan magnet;
 b. gaya pada kawat sepanjang 3 mm.
7. Sebuah solenoida berongga terdiri atas 500 lilitan, panjang 60 cm, dan berarus 2 A. Pada titik pusat solenoida digantung sebuah *loop* kawat yang luas penampangnya 100 cm^2. Tentukan besar fluks magnetik yang memotong loop, jika sudut antara sumbu loop dan sumbu solenoida adalah
 a. 0°;
 b. 90°;
 c. 53°.
8. Sebuah medan magnetik diberikan oleh $B(t) = 0{,}2\ t - 0{,}5\ t^2$. B dalam T dan t dalam s. Medan magnetik tersebut diarahkan tegak lurus pada bidang sebuah kumparan lingkaran dengan jari jari 2 cm, hambatan total 4 Ω, dan memiliki 25 lilitan. Tentukan daya disipasi selama 3 s.
9. Sebuah tegangan sinusoidal dengan tegangan maksimum 6,0 V efektif dan frekuensi 1.000 Hz dihubungkan ke ujung-ujung sebuah induktor murni. Jika arus efektif 1,9 mA, tentukanlah nilai induktansi induktor itu.
10. Sebuah resistor ($R = 900\ \Omega$), sebuah kapasitor ($C = 2{,}5\ \mu$F), dan sebuah induktor ($L = 0{,}25$ H) disusun seri satu dengan yang lainnya. Rangkaian dihubungkan pada sumber AC dengan $V_m = 150$ V dan frekuensi sudut 400 rad/s. Hitunglah:
 a. impedansi rangkaian;
 b. arus maksimum yang diberikan oleh sumber;
 c. sudut fase antara arus dan tegangan.
 d. Apakah arus mendahului atau terlambat terhadap tegangan.

Bab 7



Sumber: *CD Image*

Matahari merupakan sumber energi yang utama bagi Bumi. Matahari memberikan energi melalui radiasi gelombang yang dipancarkannya.

Radiasi Benda Hitam

Hasil yang harus Anda capai:

menganalisis berbagai besaran fisis dan gejala kuantum dan batas-batas berlakunya relativitas Einstein dalam paradigma Fisika Modern.

Setelah mempelajari bab ini, Anda harus mampu:

menganalisis secara kualitatif gejala kuantum yang mencakup hakikat dan sifat-sifat radiasi benda hitam, serta penerapannya.

Matahari merupakan sumber kehidupan di Bumi. Energi yang dipancarkan Matahari membantu semua tumbuhan berklorofil untuk melakukan fotosintesis, yaitu proses pembuatan makanan. Tumbuhan merupakan sumber makanan utama bagi manusia dan hewan. Jadi, secara tidak langsung manusia dan hewan bergantung pada energi yang dipancarkan Matahari. Selain itu, energi yang dipancarkan Matahari membuat suhu di Bumi tetap hangat, tidak terlalu dingin sehingga kehidupan di Bumi tetap terjaga. Pernahkan Anda berpikir berapa besar energi yang dipancarkan Matahari atau berapa suhu Matahari sehingga memiliki energi yang sangat besar? Menurut beberapa penelitian, suhu di permukaan Matahari sekitar 6.000 °C. Apakah Anda bisa menduga bagaimana cara ilmuwan tersebut menghitung suhu Matahari? Hal menarik lainnya adalah radiasi yang dipancarkan Matahari. Apakah sinar Matahari pada siang hari dianggap berbahaya bagi kulit dikarenakan radiasinya lebih tinggi? Apakah hubungan antara radiasi yang dipancarkan dan suhu Matahari?

Pertanyaan-pertanyaan tersebut dapat Anda jawab setelah Anda memahami konsep radiasi benda hitam. Dalam bab ini, Anda akan mendapatkan beberapa fenomena alam yang sebenarnya merupakan aplikasi dari konsep fisika.

A. Pengertian Radiasi Benda Hitam

B. Dualisme Gelombang Partikel

Tes Kompetensi Awal

Sebelum mempelajari konsep Radiasi Benda Hitam, kerjakanlah soal-soal berikut dalam buku latihan.

1. Jika Anda menjemur dua kain basah yang berwarna hitam dan putih di bawah sinar Matahari, kain manakah yang akan lebih cepat kering? Jelaskan mengapa demikian?
2. Apa yang dimaksud dengan benda hitam sempurna?
3. Apakah setiap benda selalu memancarkan energi?
4. Apa yang dimaksud dualisme gelombang partikel?
5. Apa yang dimaksud efek fotolistrik dan efek Compton? Sebutkan juga tokoh-tokoh penemuan gejala tersebut.

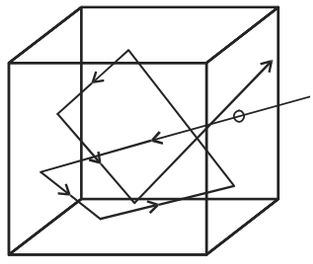
A. Pengertian Radiasi Benda Hitam

1. Radiasi Benda Hitam

Anda telah belajar di kelas X tentang pancaran atau radiasi oleh suatu benda. Misalnya, hubungan antara banyaknya energi yang dipancarkan dan suhu yang dimiliki suatu benda. Secara sederhana, Anda dapat melakukan pengamatan melalui sebuah kegiatan yang sering dilakukan. Misalnya, ketika Anda berolahraga pada pagi hari yang cerah, Anda akan merasakan adanya kalor yang dipancarkan oleh cahaya Matahari ke tubuh. Ketika Anda masuk ke dalam ruangan akan terasa bahwa suhu ruangan meningkat. Hal tersebut menunjukkan adanya kalor yang dipancarkan dari tubuhmu terhadap lingkungan dengan cara radiasi.

Contoh tersebut membuktikan bahwa benda akan memancarkan radiasi elektromagnetik jika memiliki suhu tinggi. Radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh benda disebut *radiasi termal*.

Tahukah Anda, apa yang dimaksud dengan benda hitam? *Benda hitam adalah suatu sistem yang dapat menyerap semua radiasi kalor yang mengenai benda atau sistem tersebut*. Supaya Anda dapat lebih memahami tentang benda hitam, perhatikan gambar berikut.



Gambar 7.1
Cahaya yang masuk ke dalam kotak yang dianggap sebagai benda hitam sempurna, akan dipantulkan terus-menerus oleh dinding kotak.

Pada **Gambar 7.1** diperlihatkan sebuah kotak yang terbuat dari logam yang dapat dianggap sebagai benda hitam sempurna, dan salah satu sisinya dibuat lubang. Cahaya yang masuk melalui lubang dipantulkan terus-menerus oleh dinding kotak dan hampir dapat dipastikan tidak ada lagi cahaya yang keluar. Ini artinya, lubang telah berfungsi menyerap semua radiasi kalor yang ada. Radiasi cahaya yang keluar dari dalam kotak hitam melalui sebuah lubang berasal dari osilator-osilator harmonik yang bergetar di dalam kotak dengan modus getar tertentu. Atom-atom pada dinding kotak akan menyerap energi panas dan bergetar. Atom-atom ini akan berlaku sebagai osilator harmonik yang menimbulkan gelombang elektromagnetik. Gelombang elektromagnetik yang ditimbulkan oleh osilator akan dipantulkan berulang-ulang oleh dinding kotak dan membentuk gelombang berdiri.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa intensitas radiasi termal berbanding lurus dengan pangkat empat suhu benda. Semakin tinggi suhu sebuah benda, semakin besar pula energi kalor yang dipancarkan. Selain itu, energi kalor dan intensitas radiasi termal sangat bergantung pada kondisi, bentuk, dan permukaan yang dimiliki benda. Menurut **Stefan-Boltzmann**, intensitas radiasi termal suatu benda dinyatakan dengan

$$I = e\sigma T^4 \qquad (7\text{–}1)$$

Keterangan:
e = emisivitas benda ($0 < e < 1$), untuk benda hitam sempurna $e = 1$
T = suhu (K)
σ = konstanta Stefan Boltzmann = $5{,}67 \times 10^{-8}$ W/m^2K^4

Oleh karena intensitas adalah energi yang yang dipancarkan tiap satuan waktu dan tiap satuan luas, maka intensitas radiasi termal dapat juga dinyatakan sebagai daya per satuan luas.

$$I = \frac{P}{A} \text{ dan } P = I\,A \qquad (7\text{–}2)$$

Keterangan:
I = intensitas radiasi termal (W/m^2)
P = daya (W)
A = luas permukaan benda (m^2)

Dengan mensubstitusikan **Persamaan (7–2)** ke **Persamaan (7–1),** maka daya radiasi yang dipancarkan benda akan memiliki persamaan

$$P = e\sigma AT^4 \qquad (7\text{–}3)$$

Pada suhu ruang sekitar 25 °C, radiasi termal yang dipancarkan benda tidak dapat terlihat oleh mata. Akan tetapi, benda-benda tersebut pada suhu 25 °C dapat terlihat. Hal tersebut disebabkan benda-benda itu memantulkan cahaya. Jadi, jika Anda ingin mengamati radiasi termal saja, harus menggunakan benda yang tidak memantulkan cahaya, misalnya benda-benda yang berwarna hitam. Benda hitam menyerap seluruh radiasi yang datang kepadanya. Hal ini dapat Anda amati ketika seseorang memanaskan sebatang besi. Pada suhu di bawah 25 °C belum tampak spektrum warna yang ditimbulkan dari besi itu, setelah suhu dinaikkan dan besi mulai membara akan mulai tampak perubahan spektrum warna bersamaan dengan kenaikan suhu.

Contoh 7.1

Sebuah benda memiliki suhu sebesar 227 °C. Jika konstanta emisivitas benda tersebut $\frac{3}{5}$, tentukan intensitas radiasi yang dipancarkan.

Jawab:

Diketahui: $T = (273+227)\text{K} = 500\text{ K}$; $e = \frac{3}{5}$;
$\sigma = 5{,}6703 \times 10^{-8}$ W/m^2 K^4
Berdasarkan **Persamaan (7–1)** akan diperoleh
$I = e\,\sigma\,T^4 \Rightarrow (3/5)\,(5{,}6703 \times 10^{-8}\text{ W/m}^2\text{K}^4)\,(500\text{K})^4$
$I = 2.126{,}36$ W/m^2
Jadi, intensitas radiasi termal yang dipancarkan benda tersebut adalah 2.126,36 W/m^2.

Ingatlah

Dalam SI, suhu menggunakan satuan derajat Kelvin.

Contoh 7.2

Kawat spiral lampu pijar memiliki luas permukaan 50 mm^2 dan suhunya 1.127°C. Diandaikan bahwa 60% dari energi listrik yang dihantarkan pada lampu diradiasikan dalam bentuk kalor, dan kawat pijar bersifat seperti benda hitam. Berapa ampere arus yang mengalir dalam lampu yang dihubungkan dengan stop kontak (bertegangan 200 V) agar lampu tersebut dapat berfungsi?

Ingatlah

Dalam kehidupan sehari-hari tidak ada benda yang dapat menyerap seluruh radiasi yang mengenainya.

Jawab:
Diketahui:
luas permukaan (A) = 50 mm^2 = 50×10^{-6} m^2; suhu mutlak (T) = (1127+273)K = 1400 K; emisivitas (e) = 1 (anggap benda hitam); σ = 5,67 × 10^{-8} W/m^2 K^4.
Daya kalor radiasi yang dipancarkan oleh lampu pijar dihitung melalui **Persamaan (7–3)**, yaitu
$P = e\,\sigma\,A\,T^4$
P = (1) (5,67$\times10^{-8}$ Wb/m^2 K^4) (50$\times10^{-6}$ m^2) (1400 K)^4 = 10,89 W
Daya kalor radiasi ini adalah 60% dari daya listrik yang diberikan ke lampu pijar.

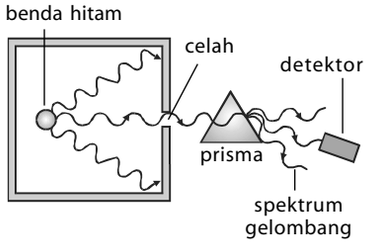
$$\text{Jadi, } 10{,}89\text{ W} = 60\% \times P_{\text{listrik}} \Rightarrow P_{\text{listrik}} = \frac{10{,}89\text{ W}}{0{,}60} = 18{,}15\text{ W}$$

Tegangan listrik, V = 220 volt.
Arus listrik yang mengalir melalui lampu pijar dihitung dari rumus daya listrik,

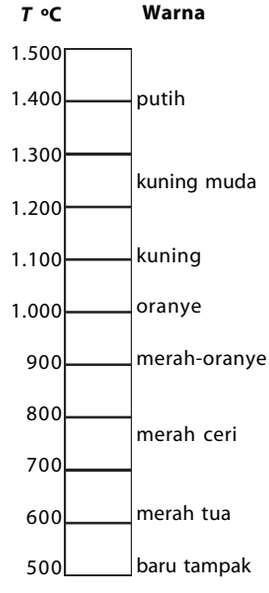
$$P = V\,I \Rightarrow I = \frac{P}{V} \Rightarrow \frac{18{,}15\text{ W}}{220\text{ V}} = 0{,}0825\text{ A}.$$

2. Spektrum Radiasi Benda Hitam

Jika suatu benda padat dipanaskan, benda tersebut akan memancarkan radiasi kalor dalam bentuk spektrum gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang dan frekuensi yang berbeda. Pada suhu yang lebih tinggi akan terdapat radiasi infra merah yang tidak dapat dilihat tetapi dapat dirasakan panasnya. Hal ini dapat diamati pada sepotong logam yang dipanaskan hingga mencapai suhu 2.000 K. Logam berpijar dengan warna kuning atau keputih-putihan. Radiasi gelombang yang dipancarkan kemudian dilewatkan melalui celah agar diperoleh berkas gelombang yang sempit, seperti tampak pada **Gambar 7.2**.



Gambar 7.2
Percobaan untuk mengamati spektrum radiasi benda hitam.



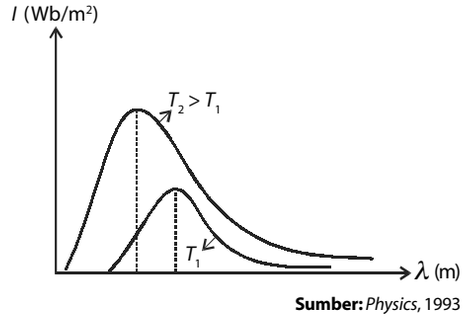
Sumber: *Physics*, 1993

Gambar 7.3
Spektrum warna pijar suatu benda panas berubah terhadap suhunya.

Dengan demikian, gelombang akan terdispersi menurut panjang gelombang setiap spektrum. Detektor yang terlihat pada gambar dapat digeser-geser menurut sudut deviasi gelombang terdispersi. Percobaan ini dilakukan pada suhu benda hitam yang berbeda-beda. Pengamatan pada intensitas spektrum radiasi menghasilkan data yang ditunjukkan pada **Gambar 7.3**.

Gambar 7.3 menunjukkan bahwa apabila suhu suatu benda terus dinaikkan, intensitas relatif dari spektrum cahaya yang dipancarkannya berubah. Ini menyebabkan pergeseran dalam warna-warni spektrum yang teramati yang dapat digunakan untuk menaksir suhu suatu benda. Terlihat juga pergeseran panjang gelombang maksimum (λ_{maks}). Semakin tinggi suhu suatu benda, λ_{maks} semakin bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih pendek.

Agar Anda lebih memahami Hukum Pergeseran Wien, perhatikan **Gambar 7.4** berikut.



Sumber: *Physics*, 1993

Gambar 7.4
Grafik pergeseran panjang gelombang maksimum pada saat suhu berubah dari T_1 ke T_2.

Dari **Gambar 7.4** terlihat bahwa panjang gelombang intensitas maksimum benda yang suhunya tinggi lebih pendek dari panjang gelombang intensitas benda yang suhunya rendah. Gejala pergeseran λ_{maks} pada radiasi benda hitam disebut Hukum Pergeseran Wien. Secara matematis, Hukum Pergeseran Wien dinyatakan dalam perumusan berikut.

$$\lambda_{maks}\, T = \text{konstan} \qquad (7\text{–}4)$$

Wien menemukan bahwa hasil kali antara λ_{maks} dan suhu mutlak merupakan bilangan konstan seperti pada **Persamaan (7–4)**, dan bilangan konstan pada perumusan Hukum Pergeseran Wien bernilai $2{,}898 \times 10^{-3}$ mK.

Hukum Pergeseran Wien juga digunakan untuk memperkirakan suhu sebuah bintang dengan melihat warna cahaya sebuah bintang, suhu bintang tersebut dapat diprediksikan.

Contoh 7.3

Sebuah benda dipanaskan hingga bersuhu 5.000 °C. Tentukanlah panjang gelombang maksimum radiasi termal yang dipancarkan benda tersebut.

Jawab:

Diketahui: $T = 5.000\,°\text{C} = (5.000 + 273)\text{K} = 5.273\,\text{K}$

berdasarkan Persamaan (14–5) akan diperoleh

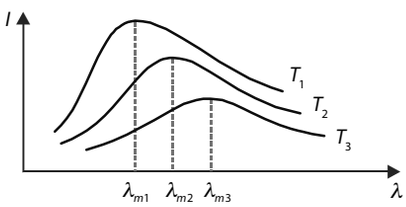
$$\lambda_{maks}\, T = C \Rightarrow \lambda_{maks}(5.273\text{K}) = 2{,}898 \times 10^{-3}\,\text{mK}$$

$$\lambda_{maks} = \frac{2{,}898 \times 10^{-3}\,\text{mK}}{5273\,\text{K}} = 5{,}50 \times 10^{-7}\ \text{m}$$

Jadi, panjang gelombang maksimum radiasi termal adalah $5{,}50 \times 10^{-7}$ m.

Contoh 7.4

Berdasarkan grafik intensitas radiasi (I) terhadap panjang gelombang, seperti ditunjukkan pada gambar di samping, bagaimanakah hubungan antara suhu mutlak T_1, T_2, dan T_3?



Jawab:

Dari grafik pada gambar di samping diperoleh bahwa urutan panjang gelombang untuk intensitas radiasi maksimum adalah $\lambda_{m1} < \lambda_{m2} < \lambda_{m3}$. Berdasarkan hukum pergeseran Wien (**Persamaan 7–4**) diperoleh

$$\lambda_m T = C \text{ atau } \lambda_m = \frac{C}{T}$$

Jadi, $\lambda_{m1} < \lambda_{m2} < \lambda_{m3}$

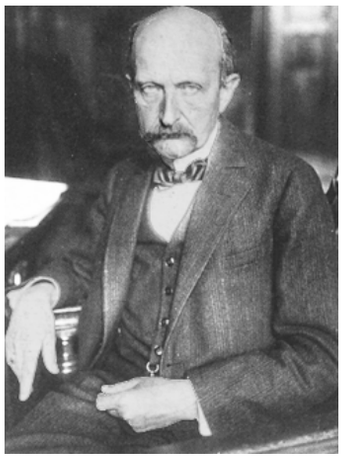
$\frac{C}{T_1} < \frac{C}{T_2} < \frac{C}{T_3}$, diperoleh $T_1 > T_2 > T_3$.

3. Pendekatan Teori Rayleigh–Jeans

Pada tahun 1890, muncul pertanyaan bagaimana menjelaskan spektrum radiasi benda hitam. Pengamatan dan eksperimen yang telah dilakukan pada masa itu mencoba mencari penjelasan. Spektrum radiasi

Tokoh

Max Planck
(1858 – 1947)

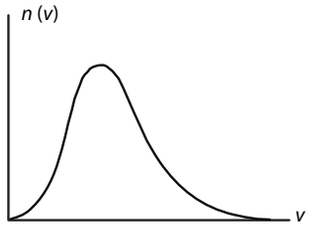


Sumber: *Fundamental Of Physics*, 2001

Max Planck dilahirkan di Kiel, Jerman. Ia belajar di Munich dan Berlin. Seperti banyak ahli fisika lainnya, ia seorang pemain musik yang pandai. Pada tahun 1900 M, setelah 6 tahun belajar di Universitas Berlin, ia menyatakan bahwa kunci pemahaman radiasi benda hitam adalah anggapan bahwa pemancaran dan penyerapan radiasi terjadi dalam kuantum energi *hf*. Penemuan yang menghasilkan hadiah Nobel 1918 ini sekarang dianggap sebagai tonggak dari fisika modern. Walaupun selama **Hitler** berkuasa, ia tetap tinggal di Jerman. Ia memprotes perlakuan **Nazi** kepada ilmuwan Yahudi dan sebagai akibatnya ia harus melepaskan kedudukannya sebagai presiden Institut Kaiser Wilhelm. Setelah perang dunia kedua, institut tersebut diberi nama Institut Planck dan ia kembali menjabat sebagai presiden sampai akhir hayatnya.

benda hitam diterangkan oleh **Lord Rayleigh** (1842–1919) dan **Sir James Hopward Jeans** (1877–1946). Perumusan mereka menggunakan teori fisika klasik seperti teori kinetik gas.

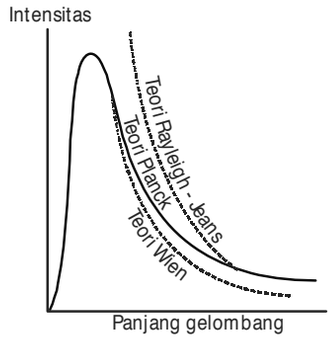
Di Kelas XI, Anda telah mempelajari materi panas benda berhubungan dengan energi kinetik molekul gas. Teori ekipartisi menyatakan bahwa energi total gas dalam suatu ruangan tertutup dibagi secara merata ke setiap molekul yang terdapat di dalam ruangan. Jika energi total sistem adalah E dan banyaknya molekul yang berada dalam ruangan adalah N, energi rata-rata yang dimiliki oleh setiap molekul adalah E/N. Energi ini terkandung dalam bentuk energi kinetik setiap molekul. Akan tetapi, tidak berarti semua molekul memiliki energi yang sama, yaitu E/N. Nilai tersebut hanyalah merupakan nilai rata-rata.



Gambar 7.5
Sebaran jumlah partikel yang memiliki kecepatan (v).

Gambar 7.5 memperlihatkan sebaran kecepatan yang dimiliki molekul gas. Sebaran energi kecepatan karena energi kinetik selalu berhubungan dengan kecepatan. **Rayleigh-Jeans** melihat bahwa kurva sebaran itu serupa dengan hasil yang diperoleh pada intensitas spektrum radiasi termal. Mereka beranggapan ada kemiripan antara sifat panas benda dan radiasi termal. Dengan pendekatan yang mereka lakukan, **Rayleigh-Jeans** memperoleh perumusan bahwa intensitas radiasi berbanding terbalik dengan pangkat empat panjang gelombang (λ).

Untuk λ yang besar, intensitas akan semakin kecil. Apabila λ mendekati tak hingga, intensitas akan mendekati nol. Hal ini sesuai dengan hasil empiris. Akan tetapi, apabila λ mendekati nol, hal ini sangat menyimpang dari hasil empiris yang menunjukkan bahwa intensitas mendekati nol ketika λ semakin mengecil.



Gambar 7.6
Perbandingan teori **Wien**, dan teori **Rayleigh-Jeans** dengan teori **Planck** yang memenuhi data percobaan.

Penyimpangan persamaan Rayleigh-Jeans yang sangat jauh ini dinamakan "Bencana Ultra Violet" karena λ yang kecil berada dalam wilayah gelombang ultraviolet.

Gambar 7.6 menunjukkan hubungan intensitas dan panjang gelombang antara kurva Rayleigh-Jeans dan kurva Wien. Teori **Wien** dapat menerangkan spektrum pada panjang gelombang yang pendek, tetapi menyimpang ketika menerangkan panjang gelombang yang panjang. Sebaliknya, teori **Rayleigh-Jeans** dapat menerangkan spektrum pada panjang gelombang yang panjang, tetapi menyimpang ketika menerangkan panjang gelombang yang pendek.

4. Teori Planck

Teori klasik tentang cahaya sebagai gelombang elektromagnetik dapat menjelaskan dari mana asal radiasi kalor, tetapi tidak bisa dengan tepat memprediksikan spektrum cahaya yang dipancarkan sebagaimana yang teramati oleh **Wien**. Teori **Wien** mampu menjelaskan radiasi benda hitam untuk panjang gelombang yang pendek, tetapi gagal untuk panjang gelombang yang panjang. Sebaliknya, teori **Rayleigh-Jeans** berhasil menjelaskan radiasi benda hitam untuk panjang gelombang yang panjang, tetapi gagal untuk panjang gelombang yang pendek.

Akhirnya, penjelasan yang memuaskan lahir dari seorang fisikawan Jerman, **Max Planck** (1858–1947). Ia mencoba melakukan pendekatan lain dengan mengajukan suatu rumus empiris dan ternyata sangat cocok dengan hasil pengamatannya.

Tugas Anda 7.1

Carilah dari buku-buku tentang formula yang digunakan **Rayleigh-Jeans** untuk menjelaskan intensitas radiasi benda hitam.

Planck mencari dasar teori untuk rumus empirisnya. Dua bulan kemudian, ia berhasil membuat asumsi yang sangat mengejutkan pada saat itu, yaitu tentang getaran molekul-molekul di permukaan benda hitam. **Planck** mengemukakan postulatnya sebagai berikut.

1) Energi radiasi yang dipancarkan oleh getaran molekul-molekul (osilator) benda merupakan paket-paket (kuanta) energi. Besarnya energi dalam setiap paket merupakan kelipatan bilangan bulat suatu besaran "*E*", yaitu

$$E_n = n\,h\,f \qquad (7\text{–}5)$$

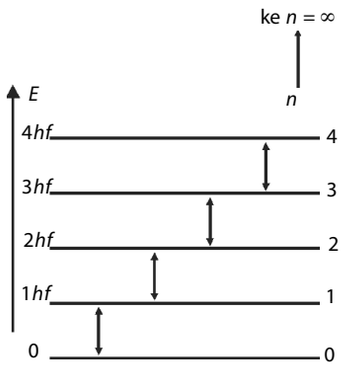
dengan n adalah bilangan asli (1,2,3, ...) yang disebut bilangan kuantum dan f adalah frekuensi getaran molekul-molekul, sedangkan h merupakan konstanta Planck yang besarnya $6{,}626 \times 10^{-34}$ Js. Oleh karena energi radiasi bersifat diskrit, dikatakan energinya terkuantisasi dan energi yang diperbolehkan dengan $n = 1,2,3, \ldots$ disebut tingkat energi.

2) Molekul-molekul menyerap atau memancarkan energi radiasi cahaya dalam paket diskrit yang disebut kuantum atau foton. Energi 1 foton karena perbedaan dua tingkat energi seperti tampak pada **Gambar 7.7** adalah

$$E = h\,f \qquad (7\text{–}6)$$

Jika molekul-molekul menyerap/memancarkan 1 foton, tingkat energinya bertambah atau berkurang sebesar hf. Gagasan **Planck** ini berlaku untuk benda hitam.

Langkah **Planck** dengan postulatnya bahwa energi osilator terkuantisasi merupakan sebuah terobosan besar, **Planck** sendiri bersama ilmuwan seangkatannya tidak menyadari hal itu. Gagasan Planck dianggap sebagai tonggak awal fisika kuantum.



Gambar 7.7
Tingkat-tingkat energi yang diperkenankan untuk satu molekul yang frekuensinya *f*.

Contoh 7.5

Jumlah minimum foton cahaya yang panjang gelombangnya $\lambda = 555$ nm untuk menimbulkan rangsangan visual pada mata normal adalah $n = 100$ foton per sekon. Jika cepat rambat cahaya $c = 3\times10^8$ m/s dan $h = 6{,}6\times10^{-34}$ Js, tentukanlah daya cahaya tersebut.

Jawab:
Energi cahaya berdasarkan **Persamaan (7–5)** adalah

$$E = n\,h\,f = n\,h\,\frac{c}{\lambda}$$

Daya cahaya tersebut dapat ditentukan sebagai berikut.

$$P = \frac{E}{t} = \frac{n\,h\,c}{t\lambda}$$

$$P = \frac{(100)(6{,}6\times10^{-34}\ \text{Js})(3\times10^{8}\ \text{m/s})}{(1\ \text{s})(555\times10^{-9}\ \text{m})} = 3{,}57\times10^{-17}\ \text{W}$$



Tantangan untuk Anda

Perumusan **Rayleigh-Jeans** tidak cocok diterapkan untuk radiasi benda hitam pada daerah panjang gelombang pendek. Dapatkah Anda **menduga**, apa implikasi dari persamaan **Rayleigh-Jeans** pada daerah panjang gelombang pendek untuk kehidupan di Bumi?

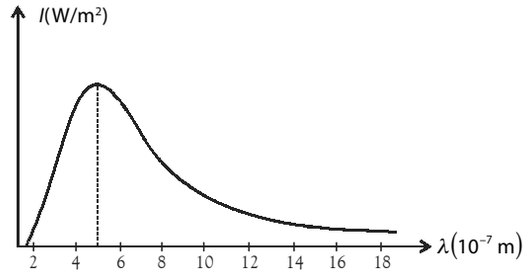
Kata Kunci

- benda hitam
- radiasi benda hitam
- emisivitas benda
- intensitas
- daya radiasi
- spektrum
- energi radiasi
- radiasi termal

5. Aplikasi Radiasi Benda Hitam untuk Mengukur Suhu Matahari

Matahari merupakan bintang yang paling dekat dengan Bumi, jaraknya sekitar 150.000.000 km. Matahari memancarkan energi kalor yang sangat berguna bagi kehidupan di Bumi. Energi tersebut berasal dari reaksi fusi hidrogen di dalam inti Matahari. Dapatkah Anda membayangkan berapa besar energi yang dihasilkan Matahari sehingga sampai jarak 150.000.000 km energi itu masih ada berupa cahaya dan kalor?

Radiasi energi Matahari sangat besar, seperti yang telah Anda pelajari. Intensitas radiasi ini berbanding lurus dengan pangkat empat suhunya. Menurut teori, radiasi yang dipancarkan ini memiliki intensitas yang berbeda-beda. Untuk lebih memahami konsep ini perhatikan **Gambar 7.8** berikut ini.



Gambar 7.8
Grafik intensitas radiasi Matahari yang diukur di luar angkasa.

Gambar 7.8 menunjukkan spektrum radiasi Matahari yang diukur di luar angkasa. Grafik tersebut sangat mirip dengan grafik intensitas radiasi benda hitam. Oleh karena itu, para astronom mengasumsikan Matahari sebagai benda hitam sehingga bisa dihitung berapa suhu di permukaan Matahari dengan menggunakan Hukum Pergeseran Wien. Dari grafik terlihat bahwa nilai intensitas maksimum terdapat pada panjang gelombang sebesar 5.000 Å (daerah panjang gelombang sinar tampak). Menurut Hukum Pergeseran Wien, akan didapatkan nilai suhu di permukaan Matahari sebagai berikut.

$$\lambda_{maks} \cdot T = 2{,}898 \times 10^{-3}\ \text{mK}$$

$$T = \frac{2{,}898 \times 10^{-3}\ \text{mK}}{5 \times 10^{-7}\ \text{m}}$$

$$T = 6000\ \text{K}$$

Selain untuk mengukur suhu Matahari, penerapan radiasi benda hitam ini dapat digunakan untuk mengukur suhu bintang lainnya, yaitu dengan menganalisis spektrum bintang tersebut.

Ingatlah

$1\ \text{Å} = 10^{-10}\ \text{m}$

Tantangan untuk Anda

Grafik pada **Gambar 7.8** menunjukkan intensitas radiasi Matahari yang diukur di luar angkasa. Apakah Anda bisa **menduga** bagaimana grafik intensitas radiasi Matahari jika diukur di permukaan Bumi? Apakah di seluruh tempat di permukaan Bumi intensitas radiasi Matahari selalu sama? Jelaskan jawaban Anda dengan bahasa yang mudah dipahami dan **diskusikanlah** bersama teman sekelas.

Mari Mencari Tahu

Salah satu isu global yang sering diangkat oleh aktivitas lingkungan hidup adalah isu tentang pemanasan Bumi. Ada sebagian negara maju yang tidak mau menandatangani *Protokol Kyoto* tentang pembatasan kadar emisi gas dari industri. Gas emisi ini sebagian besar adalah CO_2. Menurut para ahli, gas CO_2 inilah yang mengakibatkan pemanasan Bumi atau dikenal dengan istilah *Efek Rumah Kaca* (*Green House Effect*). Carilah informasi dari berbagai sumber (buku, majalah, internet, dan lain-lain) tentang hubungan antara efek rumah kaca dan radiasi benda hitam. Diskusikanlah dengan teman sekelas Anda tentang hal ini.

Tes Kompetensi Subbab A

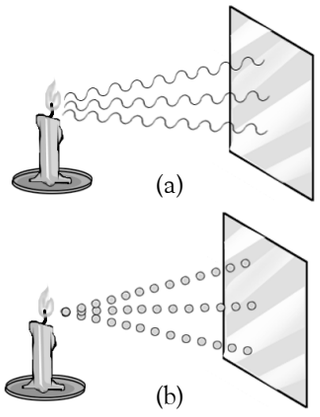
Kerjakanlah pada buku latihan.

1. Suhu kerja filamen tungsten dalam suatu lampu pijar adalah 2.450 K dan emisivitasnya 0,30. Tentukan luas permukaan filamen lampu pijar 40 W.
2. Sebuah lubang kecil pada dinding *tanur* menyerupai benda hitam. Jika luasnya 1 cm^2 dan suhunya 1.727°C (sama seperti suhu di dalam tanur), berapakah energi yang diradiasikan ke luar lubang setiap detik?
3. Bola (r = 3 cm) bersifat seperti benda hitam, berada dalam keadaan seimbang dengan lingkungannya. Ternyata, bola menyerap daya 60 kW dari lingkungannya. Berapakah suhu bola itu?
4. Lampu pijar dapat dianggap berbentuk bola. Jari-jari lampu pijar pertama adalah dua kali jari-jari lampu kedua. Suhu pijar pertama dan kedua masing-masing 57 °C dan 207 °C. Tentukan nilai perbandingan antara daya kalor radiasi lampu pertama dan lampu kedua.
5. Konstanta emisivitas sebuah benda hitam adalah 2/3. Hitunglah intensitas radiasi yang dipancarkan apabila suhu benda itu 150 K.
6. Sebuah bola logam dengan jari-jari 4 cm dipanaskan. Pada suhu 227°C, bola logam itu memancarkan radiasi dengan daya $8{,}91 \times 10^5$ watt. Hitunglah emisivitas bola logam tersebut.
7. Hitunglah daya yang dipancarkan oleh sebuah kubus yang dipanaskan hingga 327°C. Kubus tersebut memiliki panjang sisi 40 cm dan terbuat dari bahan dengan emisivitas 75%.
8. Benda A memancarkan radiasi dengan λ_{max} = 400 nm. Benda itu terus mengalami pemanasan sehingga suhunya 4 kali lipat suhu semula. Tentukanlah λ_{max} setelah pemanasan.

B. Dualisme Gelombang Partikel

1. Sifat Partikel yang Dimiliki Gelombang

Pada mulanya, banyak fisikawan yang menganggap cahaya sebagai gelombang. Hal ini diperkuat dengan adanya difraksi, polarisasi, refraksi, refleksi, dan interferensi yang sesuai dengan sifat umum gelombang. Akan tetapi, ketika para fisikawan menemukan fenomena radiasi benda hitam, efek fotolistrik, dan efek Compton, asumsi cahaya sebagai gelombang tidak dapat menjelaskan fenomena-fenomena tersebut. Kemudian, muncullah pandangan bahwa cahaya adalah partikel. Sebagai analogi, perhatikah **Gambar 7.9**. Pada gambar tersebut, Anda bisa memerhatikan perbedaan cahaya jika diasumsikan sebagai gelombang dan sebagai partikel. Dengan asumsi sebagai gelombang, cahaya dipancarkan sebagai rambatan gelombang yang kontinu. Adapun dengan asumsi sebagai partikel, cahaya dipancarkan dalam bentuk paket-paket energi yang disebut foton.



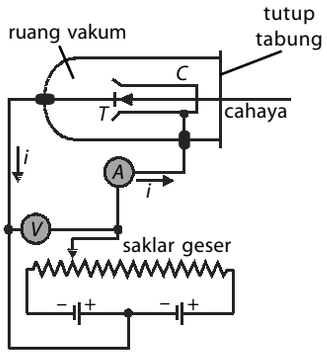
Gambar 7.9
(a) Cahaya sebagai gelombang;
(b) Cahaya sebagai paket-paket energi.

Supaya Anda lebih memahami asumsi cahaya sebagai partikel, Anda bisa mempelajari efek fotolistrik dan efek Compton berikut.

a. Efek Fotolistrik

Gejala terlepasnya elektron-elektron dari permukaan plat logam ketika disinari dengan frekuensi tertentu disebut efek fotolistrik. Elektron yang terlepas dari permukaan plat logam tersebut disebut elektron foto. Peristiwa ini pertama kali ditemukan oleh **Hertz**, seperti digambarkan pada **Gambar 7.10**.

Perangkat percobaan untuk mengamati efek fotolistrik terdiri atas tabung kaca hampa udara dan plat logam yang disebut sebagai katode. Ketika katode disinari dengan sinar ultraviolet, elektron akan terlepas dari katode dan bergerak menuju anode sehingga arus mengalir pada rangkaian. Banyaknya elektron yang terlepas dapat terlihat dari indikator kuat arus yang ditunjukkan oleh amperemeter. Energi kinetik yang dimiliki elektron dapat ditentukan dengan cara memperbesar beda potensial antara katode dan anode sehingga beda potensial bersifat menahan laju



Gambar 7.10
Skema eksperimen efek fotolistrik.

elektron. Bersamaan dengan kenaikan beda potensial, penunjukan jarum amperemeter akan mengecil. Jika pada suatu ketika jarum ampermeter menunjuk angka nol, besarnya energi potensial sama dengan besar energi kinetik yang dimiliki elektron. Nilai beda potensial pada saat itu disebut potensial henti.

Energi potensial ε yang diberikan dapat diprediksikan sebagai sebuah bukit yang harus dilewati elektron seperti pada **Gambar 7.11(a)**. Apabila bukit potensial terus dipertinggi, suatu saat amperemeter yang dipasang di balik bukit menunjukkan angka nol. Ini berarti, energi kinetik elektron tidak cukup lagi untuk melewati bukit potensial sehingga besarnya potensial henti V_S bersesuaian dengan energi kinetik elektron.

$$E_k = e\,V_S \qquad (7\text{–}7)$$

atau

$$\frac{1}{2}mv^2_{\text{maks}} = eV_0 \qquad (7\text{–}8)$$

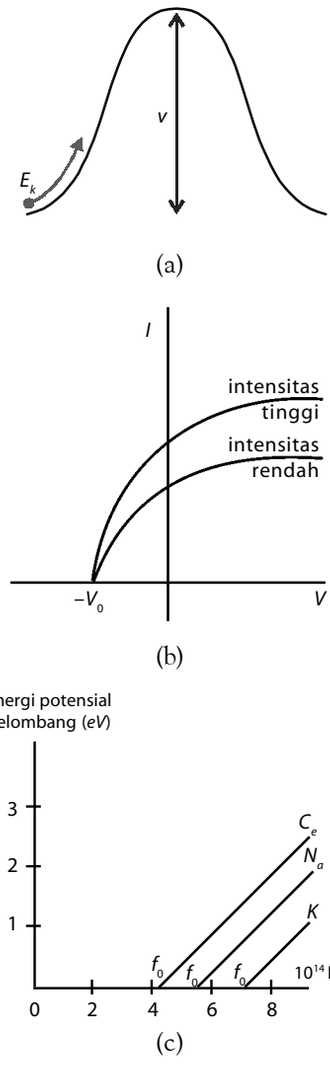
Eksperimen yang dilakukan oleh **Einstein** dengan mengubah-ubah frekuensi cahaya yang jatuh pada plat logam (katode), intensitas cahaya, dan potensial penghalang pada efek fotolistrik memberikan beberapa kesimpulan sebagai berikut.

a) Besar energi kinetik maksimum elektron tidak bergantung pada intensitas cahaya (perhatikan **Gambar 7.11(b)**).
b) Setiap permukaan logam membutuhkan frekuensi minimum tertentu yang disebut frekuensi ambang (f_0) agar efek fotolistrik dapat berlangsung (perhatikan **Gambar 7.11(c)**).
c) Elektron-elektron dibebaskan dari permukaan logam hampir tanpa selang waktu, yaitu kurang dari 10^{-9} sekon setelah penyinaran.
d) Teori gelombang tidak dapat menjelaskan mengapa energi kinetik maksimum elektron bertambah jika frekuensi cahaya diperbesar.

Hasil eksperimen tersebut tidak dapat dijelaskan oleh teori klasik tentang gelombang elektromagnetik. Menurut teori klasik, energi yang dikandung gelombang elektromagnetik bersesuaian dengan intensitasnya. Apabila intensitas semakin tinggi, energi gelombang elektromagnetik akan meninggi pula. Medan listrik yang dibawa gelombang elektromagnetik akan memberikan gaya pada elektron di permukaan logam sehingga elektron memperoleh energi dari gelombang. Jika energi yang dimiliki elektron cukup besar, elektron akan terlepas dari permukaan logam. Berdasarkan hal itu, seharusnya energi kinetik elektron bergantung pada intensitas cahaya.

Kehadiran frekuensi ambang pun tidak dapat dijelaskan dengan teori klasik. Eksperimen menunjukkan bahwa sekecil apapun intensitas cahaya, apabila frekuensinya lebih besar daripada frekuensi f_0, efek fotolistrik akan terjadi. Menurut teori klasik, seharusnya yang ada adalah intensitas ambang. Dengan kebergantungan energi cahaya pada intensitasnya, hubungan linear antara energi kinetik elektron dan frekuensi gelombang elektromagnetik sama sekali tidak dapat dijelaskan.

Menurut **Albert Einstein**, semua energi foton diberikan kepada elektron, dan ini menyebabkan foton lenyap. Ia berpandangan bahwa kuantum merupakan sifat gelombang itu sendiri. Menurutnya, cahaya



Sumber: *Fisika untuk Sains dan Teknik Tipler*

Gambar 7.11
(a) Apabila energi kinetik elektron melebihi energi potensial penghalang, elektron akan dapat mendaki bukit potensial; (b) Energi kinetik elektron tidak bergantung pada intensitas cahaya; (c) Setiap permukaan memiliki frekuensi (f_0) berbeda.

terdiri atas paket-paket yang disebut sebagai foton. Foton-foton merupakan partikel yang tidak bermassa yang diserap dan dipancarkan. Energi yang dimiliki oleh foton sama dengan kuanta yang dikemukakan oleh Planck, yaitu $E = hf$, dengan h adalah konstanta Planck dan f adalah frekuensi gelombang elektromagnetik.

Einstein dapat menjelaskan secara sempurna hasil efek fotolistrik. Cahaya yang jatuh di atas logam dilukiskan sebagai rentetan foton yang menumbuk pada logam, setiap foton menumbuk elektron dalam logam. Pada peristiwa tumbukan tersebut, foton memberikan seluruh energinya kepada elektron dan foton itu sendiri menjadi lenyap.

Energi yang diperlukan untuk melepaskan diri dari permukaan logam disebut fungsi kerja W. Untuk jenis logam yang berbeda, tentunya fungsi kerja akan berbeda pula karena perbedaan energi ikat antara elektron dan ion dalam logam. Jadi, untuk logam tertentu berlaku

$$W = h f_0 \qquad (7\text{–}9)$$

Jika frekuensi foton lebih besar daripada frekuensi ambang, kelebihan energi yang diterima elektron itu akan menjadi energi kinetik elektron.

$$h f - h f_0 = E_k \qquad (7\text{–}10)$$

$$h f = h f_0 + E_k$$

$$h f = W + E_k \qquad (7\text{–}11)$$

Keterangan:
h = konstanta Planck = $6{,}63 \times 10^{-34}$ (Js)
f = frekuensi gelombang cahaya (Hz)
f_0 = frekuensi ambang (Hz)

Jika dibuat dalam sebuah tabel, fungsi kerja fotolistrik beberapa jenis logam bisa dilihat dalam **Tabel 7.1**.

Tabel 7.1
Fungsi Kerja Elektron pada Beberapa Logam

Logam	Lambang	Fungsi Kerja (W) eV
Cesium	Cs	2,14
Kalium	K	2,30
Natrium	Na	2,75
Emas	Au	5,31
Tembaga	Cu	4,94
Perak	Ag	4,74
Platina	Pt	5,65

Sumber: *Physics*, 1993

Contoh 7.6

Frekuensi ambang suatu bahan $1{,}5 \times 10^{16}$ Hz. Jika bahan tersebut disinari dengan sinar yang memiliki frekuensi 2×10^{16} Hz, tentukan besar energi kinetik elektron yang terlepas dari permukaan logam tersebut.

Jawab:
$E_k = hf - hf_0 = h\,(f - f_0)$
$E_k = 6{,}63 \times 10^{-34}$ Js $(2 \times 10^{16}$ Hz $- 1{,}5 \times 10^{16}$ Hz$)$
$E_k = 6{,}63 \times 10^{-34}$ Js $(0{,}5 \times 10^{16}$ Hz$) = 3{,}31 \times 10^{-18}$ joule.

Ingatlah

1 eV = $1{,}6 \times 10^{-19}$ J

Informasi untuk Anda

Efek fotolistrik selain memiliki peranan penting dalam teori foton pada cahaya, juga memiliki banyak sekali aplikasi dalam kehidupan sehari-hari. Sebagai contoh adalah alarm pencuri dan pembuka otomatis yang juga menggunakan sirkuit fotolistrik. Ketika seseorang menghalangi sinar yang dipancarkan, penurunan arus listrik dapat mengaktifkan saklar sehingga bel berbunyi atau pintu terbuka. Biasanya sinar yang digunakan adalah sinar ultraviolet dan inframerah karena kedua sinar ini tidak terlihat.

Information for You

The photoelectric effect, besides playing an important historical role in confirming the photon theory of light, also has many practical applications. Burglar alarms and automatic door openers often make use of the photocell circuit. When a person interrupts the beam of light, the sudden drop in current in the circuit activates a switch which operates a bell or opens the door. UV or IR light is sometimes used in burglar alarms because of its invisibility.

Sumber: *Physics for Scientist & Engineers*

Ingatlah

Foton merupakan paket-paket energi pada cahaya. Konsep ini merupakan kelanjutan dari asumsi cahaya merupakan partikel.

Oleh karena 1 joule = $1{,}6 \times 10^{-19}$ eV, besar energi kinetik elektron yang terlepas adalah

$$E_k = \frac{3{,}31 \times 10^{-18}}{1{,}6 \times 10^{-19}} \text{ eV} = 20{,}6 \text{ eV}$$

Contoh 7.7

Kalium disinari dengan cahaya ultraviolet yang panjang gelombangnya 2.500 Å. Jika fungsi kerja kalium 2,21 eV, tentukanlah nilai potensial henti pada peristiwa efek fotolistrik tersebut ($h = 6{,}6 \times 10^{-34}$ Js).

Jawab:

Diketahui: $\lambda = 2.500 \text{ Å} = 2{,}5 \times 10^{-7}$ m,

$W_0 = 2{,}21 \text{ eV} = (2{,}21 \text{ eV})\ (1{,}6 \times 10^{-19} \text{ Js})$

$= 3{,}536 \times 10^{-19}$ J

Energi kinetik maksimum elektron: $Ek_m = hf - W_0 = h\frac{c}{\lambda} - W_0$

$$Ek_m = (6{,}6 \times 10^{-34} \text{ Js})\frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2{,}5 \times 10^{-7} \text{ m}} - 3{,}536 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$Ek_m = 4{,}38 \times 10^{-19}$ J

Kemudian, gunakan **Persamaan (7–8)**, sehingga

$$Ek_m = eV_0 \text{ atau } V_0 = \frac{Ek_m}{e} \Rightarrow V_0 = \frac{4{,}38 \times 10^{-19} \text{ J}}{1{,}6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 2{,}74 \text{ V}$$

Jadi, potensial henti pada efek fotolistrik tersebut adalah 2,74 V.

Tugas Anda 7.2

Proses terjadinya sinar-X merupakan kebalikan dari proses fotolistrik. Carilah informasi dari berbagai sumber tentang sinar-X dan **diskusikanlah** bersama teman sekelas Anda.

b. Efek Compton

Dalam peristiwa efek fotolistrik, cahaya yang dijatuhkan pada keping logam diperlakukan sebagai paket energi yang disebut foton. Foton itu mengalami peristiwa tumbukan dengan elektron. Biasanya tumbukan selalu dihubungkan dengan momentum. Pada peristiwa tersebut akan berlaku Hukum Kekekalan Momentum dan Hukum Kekekalan Energi.

Penelitian hamburan sinar-X yang dilakukan **Arthur H. Compton** (1892–1962) menghasilkan fenomena baru, yaitu pergeseran panjang gelombang atau perubahan frekuensi sebelum dan sesudah tumbukan. Gejala ini dijelaskan oleh **Compton** dengan menganggap bahwa yang terjadi adalah tumbukan antara kuantum cahaya (foton) dan elektron bebas. Ketika foton menumbuk elektron, sebagian energi foton akan diberikan kepada elektron sehingga elektron memiliki energi kinetik. Adapun energi foton setelah tumbukan akan berkurang. Menurut teori klasik, pengurangan energi tidak akan diikuti oleh perubahan frekuensi atau panjang gelombang. Namun, menurut teori kuantum, perubahan energi berarti akan terjadi perubahan frekuensi dan perubahan panjang gelombang. Ini dibuktikan dari hasil pengamatan yang menunjukkan bahwa setelah tumbukan, panjang gelombang foton bertambah besar ($\lambda' > \lambda$). Oleh karena energi foton dirumuskan sebagai $h\frac{c}{\lambda}$, jelaslah bahwa energi foton setelah tumbukan akan berkurang.

1) Momentum foton

Kesetaraan massa dan energi menurut **Einstein** adalah $E = mc^2$ (Hal tersebut akan Anda pelajari dalam pokok bahasan berikutnya), sedangkan

menurut Planck, cahaya berbentuk paket-paket energi dengan energi foton sebesar $E = h f$. Dengan demikian, pendekatan secara relativistik dapat ditulis

$$mc^2 = hf \Rightarrow \frac{hf}{c} = mc \qquad (7\text{–}12)$$

Dari **Persamaan (7–12)**, Anda dapat memperoleh persamaan momentum relativistik dari sebuah foton, yaitu

$$p = mc = \frac{hf}{c} \qquad (7\text{–}13)$$

Diketahui $\lambda = \frac{c}{f}$ dan $\frac{1}{\lambda} = \frac{f}{c}$, maka **Persamaan (7–13)** dapat ditulis

$$p = \frac{h}{\lambda} \text{ atau } \lambda = \frac{h}{p} \qquad (7\text{–}14)$$

Keterangan:
p = momentum sebuah foton (kg m/s)
c = cepat rambat cahaya (m/s)
λ = panjang gelombang cahaya (m)
h = tetapan Planck = $6{,}63 \times 10^{-34}$ Js
f = frekuensi cahaya (Hz)

2) Perubahan Panjang Gelombang pada Hamburan Compton

Perhatikan tumbukan antara sebuah foton dan sebuah elektron seperti ditunjukkan pada **Gambar 7.12**. Sebelum tumbukan, foton memiliki panjang gelombang λ, dan elektron berada dalam keadaan diam. Setelah tumbukan, foton terhambur dengan sudut θ dan mengalami penurunan energi menjadi E'. Di lain pihak, sebagian elektron membentuk sudut ϕ dengan arah gerak foton sebelum tumbukan. Hamburan yang dialami oleh foton disebut hamburan Compton dengan ciri-ciri khasnya terjadi perubahan λ dan perubahan f. Untuk mengetahui perubahan energi atau panjang gelombang foton setelah terhambur, digunakan analisis dengan Hukum Kekekalan Momentum dan Hukum Kekekalan Energi. Oleh karena energi yang terlibat sangat tinggi serta kemungkinan besar kecepatan elektron setelah tumbukan sangat besar, persamaan dinamika yang digunakan adalah dinamika relativistik.

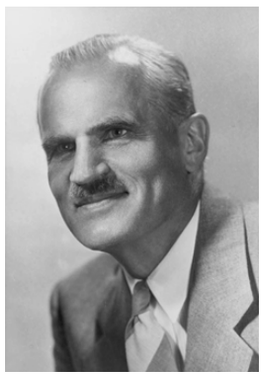
Dengan menggunakan Hukum Kekekalan Energi dan Hukum Kekekalan Momentum dalam dinamika Relativistik, didapatkan persamaan hamburan Compton sebagai berikut.

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta) \qquad (7\text{–}15)$$

Keterangan:
λ = panjang gelombang foton sebelum tumbukan (m)
λ' = panjang gelombang foton sesudah tumbukan (m)
h = tetapan Planck = $6{,}63 \times 10^{-34}$ (Js)
c = cepat rambat cahaya = 3×10^8 m/s
θ = sudut penyimpangan foton
m_0 = massa diam elektron (kg)

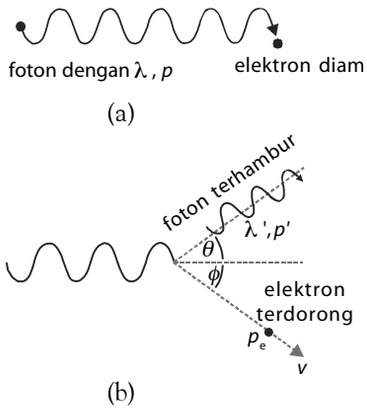
Tokoh

Arthur Compton (Holly)
(1892–1962)



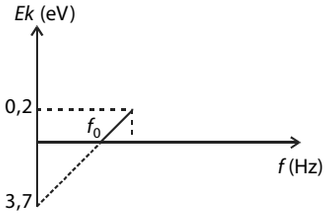
Arthur Compton adalah seorang ahli Fisika yang dilahirkan di Wooster, Ohio, USA. Dia belajar di Universitas Princetion dan lulus menjadi profesor Fisika di Chicago (1923). Dia meneliti dan menjelaskan Efek Compton, penambahan panjang gelombang sinar-X yang dihamburkan ketika bertumbukan dengan elektron. Untuk sumbangan pemikirannya tersebut, dia mendapat penghargaan Nobel Fisika pada 1927.

Sumber: *www.allbiographies.com*



Gambar 7.12
Tumbukan foton dan elektron
(a) sebelum tumbukan
(b) sesudah tumbukan

Pembahasan Soal



Grafik di atas menunjukkan hubungan antara energi kinetik maksimum elektron terhadap frekuensi foton pada efek fotolistrik. Jika h = 6,6 × 10^{-34} Js dan 1 eV = 1,6 × 10^{-19} J, besar *f* adalah

a. 48 × 10^{14} Hz
b. 21 × 10^{14} Hz
c. 14 × 10^{14} Hz
d. 9,5 × 10^{14} Hz
e. 8,9 × 10^{14} Hz

UMPTN 1996

Pembahasan

Menurut persamaan efek fotolistrik

$E_k = hf - W$

maka

$$f = \frac{E_k + W}{h}$$

Dari grafik, nilai Ek = 0,2 eV = 0,2 (1,6 × 10–19) J

Pada saat *f* = 0, berlaku

$E_k = -W$ atau $W = -E_k$

Dari grafik, saat *f* = 0, nilai E_k = –37 eV, maka W = 3,7 eV = 3,7 (1,6 × 10^{-19}) J

Jadi,

$$f = \frac{Ek + W}{h} = \frac{(0,2 + 3,7)1,6 \;\; 10^{-19}\text{J}}{6,6 \;\; 10^{-34}\text{Js}}$$

= 9,5 × 10^{14} Hz

Jawaban: d

Pada **Persamaan (7–15)**, suku $\frac{h}{m_0 c}$ disebut juga panjang gelombang Compton (λ_c), nilainya adalah

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = \frac{6,63\times10^{-34}\ \text{Js}}{(9,1\times10^{-31}\ \text{kg})(3\times10^{8}\ \text{m/s})} = 2,43\times10^{-12}\ \text{m}.$$

Contoh 7.8

Sinar-X dengan panjang gelombang $\lambda = 0,20$ nm dihamburkan oleh sebuah balok karbon. Sinar-X yang dihamburkan diamati menyimpang 45° terhadap arahnya semula. Hitung panjang gelombang sinar-X yang dihamburkan ini.

Jawab:

Beda panjang gelombang foton sebelum dan sesudah dihamburkan dapat dihitung dengan **Persamaan (7–16)**:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$$

Diketahui: $\lambda = 0,20$ nm; $h = 6,63 \times 10^{-34}$ Js; dan $m = 9,1 \times 10^{-31}$ kg

maka

$$\Delta\lambda = \frac{(6,63\times10^{-34}\ \text{Js})}{(9,1\times10^{-31}\ \text{kg})(3\times10^{8}\ \text{m/s})}(1 - \cos 45°)$$

$\Delta\lambda = 7,11 \times 10^{-13}$ m = 0,000711 nm

Panjang gelombang foton sinar-X yang dihamburkan adalah

$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = 0,20$ nm + 0,000711 nm = 0,200711 nm

2. Sifat Gelombang pada Partikel

Pada pembahasan sebelumnya telah dijelaskan bahwa gelombang memiliki sifat partikel. Sekarang muncul pertanyaan, apakah partikel memiliki sifat gelombang? Dalam peristiwa interferensi dan difraksi cahaya, sifat gelombang cahaya lebih menonjol daripada sifat partikel cahaya. Adapun dalam peristiwa efek fotolistrik dan efek Compton, sifat partikel cahaya lebih menonjol daripada sifat gelombang cahaya.

Pada 1924, Fisikawan berkebangsaan Prancis, **Louis de Broglie** adalah orang pertama yang mengajukan hipotesis bahwa partikel seperti elektron juga dapat bersifat sebagai gelombang.

a. Panjang Gelombang de Broglie

Louis de Broglie menyatakan bahwa (elektron) yang bergerak ada kemungkinan memiliki sifat gelombang dengan panjang gelombang yang sesuai. Partikel yang bergerak dengan kecepatan v memiliki momentum $p = m\,v$ atau secara relativistik dituliskan sebagai berikut.

$$p = \frac{hf}{c}$$

Oleh karena $c = f\,\lambda$ maka

$$p = \frac{hf}{f\lambda} = \frac{h}{\lambda}$$

sehingga panjang gelombang de Broglie adalah

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \qquad (7–16)$$

Keterangan:
λ = panjang gelombang partikel menurut de Broglie (m)
h = tetapan Planck = $6{,}63 \times 10^{-34}$ Js
m = massa diam partikel (kg)
v = laju partikel (m/s)

Dalam pengamatannya, **de Broglie** melihat bahwa berkas elektron dihamburkan oleh atom-atom permukaan nikel tepat seperti yang diperkirakan untuk difraksi gelombang menurut rumus Bragg dan memiliki panjang gelombang yang sesuai dengan yang diberikan oleh persamaan de Broglie. Hasil percobaan ini meyakinkan **de Broglie** bahwa partikel elektron yang bergerak dapat memiliki sifat gelombang yang dicirikan oleh panjang gelombangnya.

Contoh 7.9

Tentukan panjang gelombang de Broglie untuk benda berikut ini.
a. Bola dengan massa 0,5 kg yang bergerak dengan kecepatan 20 m/s.
b. Elektron yang bergerak dengan energi kinetik 1 eV.

Jawab:
Diketahui: $m = 0{,}5$ kg; $v = 20$ m/s.

a. $\lambda = \dfrac{h}{mv} = \dfrac{6{,}63\times10^{-34}\ \text{Js}}{(0{,}5\ \text{kg})(20\ \text{m/s})} = 6{,}63\times10^{-35}\ \text{m}$

b. $E_k = 1\,\text{eV} = 1{,}6 \times 10^{-19}\,\text{J}$

$$p = \sqrt{2mE_k} = \sqrt{(2)(9{,}1\times10^{-31}\ \text{kg})(1{,}6\times10^{-19}\ \text{J})}$$

$$= \sqrt{29{,}12\times10^{50}} = 5{,}396\times10^{-25}\ \text{kg m/s}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6{,}63\times10^{-34}\ \text{Js}}{5{,}396\times10^{-25}\ \text{kg m/s}} = 1{,}23\times10^{-9}\ \text{m}$$

Contoh 7.10

Sebuah elektron yang mula-mula diam dipercepat oleh beda potensial listrik V. Jika massa elektron m, muatan elektron e, dan tetapan Planck h, tentukanlah panjang gelombang elektron tersebut. Jika diinginkan panjang gelombang $\lambda = 0{,}35$ Å, berapa besar V yang harus diberikan? ($m = 9{,}1\times10^{-31}$ kg, $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C, dan $h = 6{,}6 \times 10^{-34}$ Js).

Jawab:
Sebuah elektron yang dipercepat dengan beda potensial V dari keadaan diam akan menerima $E_{p\,\text{listrik}} = eV$ dan mengubahnya menjadi $E_{k\,\text{elektron}} = \frac{1}{2}\,mv^2$ sehingga berlaku

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV \text{ atau } v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

Panjang gelombang de Broglie elektron adalah:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m\sqrt{\frac{2eV}{m}}} = \frac{h}{\sqrt{\frac{2m^2eV}{m}}} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{2meV}$$

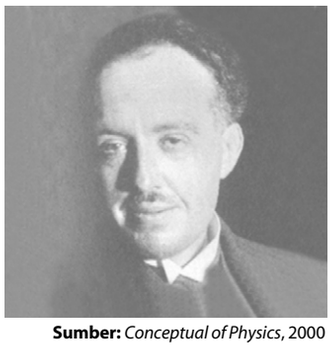
Agar $\lambda = 0{,}35$ Å $= 0{,}35 \times 10^{-10}$ m, maka V dapat dihitung sebagai berikut.

$$0{,}35\times10^{-10}\ \text{m} = \frac{6{,}6\times10^{-34}\ \text{Js}}{\sqrt{2(9{,}1\times10^{-31}\ \text{kg})(1{,}6\times10^{-19}\ \text{C})V}}$$

$(0{,}35\times10^{-10}\,\text{m})^2\ 2(9{,}1\times10^{-31}\,\text{kg})\ (1{,}6\times10^{-19}\,\text{C})\ V = (6{,}6\times10^{-34}\,\text{Js})^2$
$V = 1221$ volt

Tokoh

Louis Victor de Broglie
(1892–1987)

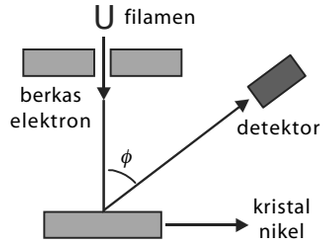


Sumber: *Conceptual of Physics*, 2000

Louis Victor De Broglie (1892–1987) lahir di Dieppe, Prancis, dan bersekolah di Sorbonne. Ia melanjutkan kuliahnya di Universitas Paris tahun 1926. Pada 1929, ia menerima hadiah Nobel dalam bidang Fisika atas teorinya mengenai sifat gelombang pada partikel. Teori ini menjadi dasar dari mekanika kuantum, cabang dari ilmu Fisika. Pada awal 1800, para fisikawan percaya bahwa cahaya terdiri atas gelombang energi. Pada 1900, **Max Planck** menunjukkan bahwa cahaya dapat bersifat partikel. Pada 1924, de Broglie menyatakan bahwa elektron dapat bersifat sebagai partikel dan gelombang.

Tantangan untuk Anda

Efek Compton diaplikasikan dalam dunia kedokteran untuk mendeteksi kepadatan tulang. Dengan bahasa Anda sendiri, dapatkah Anda menjelaskan cara kerjanya?



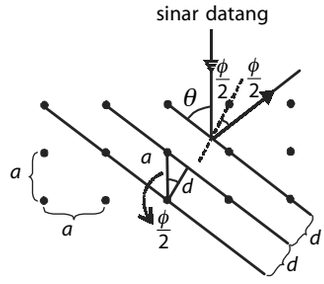
Gambar 7.13
Skema alat percobaan Davisson-Germer. Berkas elektron dijatuhkan pada kristal tunggal nikel. Interferensi yang terjadi pada sudut diamati pada detektor.

b. Eksperimen Davisson-Germer

Pada 1927, **C.J. Davisson** dan **L.H. Germer** melakukan penelitian mengenai hamburan elektron. Mereka menjatuhkan berkas elektron yang memiliki energi kinetik tertentu ke atas kristal tunggal nikel. Mereka mengamati bahwa pada sudut θ tertentu terjadi titik maksimum yang berhubungan dengan pola interferensi. Berdasarkan data yang diperoleh, panjang gelombang λ yang didapatkan ternyata ada kesesuaian antara hasil yang mereka peroleh dan panjang gelombang λ yang didapatkan menurut hipotesis de Broglie. Skema alat percobaan yang dilakukan mereka tampak pada **Gambar 7.13**.

Elektron yang digunakan dari kawat filamen pada tabung hampa udara dilewatkan melalui medan listrik dengan potensial yang dapat diatur. Setelah dihitung, panjang gelombang yang dimiliki oleh elektron ordenya sama besar dengan jarak atom-atom dalam kristal bahan padat. Dengan mengamati sudut-sudut pantul elektron setelah mengenai kristal, **Davisson** dan **Germer** memperoleh pola-pola difraksi seperti pada **Gambar 7.14** yang sama dengan pola difraksi oleh sinar-X. Hasil eksperimen **Davisson** dan **Germer** menunjukkan bahwa partikel seperti elektron dapat bersifat sebagai gelombang.

Pada eksperimen **Davisson-Germer**, berkas elektron yang jatuh pada bidang pemantul kristal dengan sudut θ dan bidang pemantul yang memiliki selang jarak sebesar d akan menghamburkan elektron dengan sudut hambur ϕ. Hubungan jarak antara atom a dan jarak antara bidang pemantul d memenuhi persamaan berikut.



Gambar 7.14
Gambaran mengenai hamburan elektron oleh bidang kristal.

$$d = a\cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \qquad (7\text{–}17)$$

Dari **Gambar 7.14** terlihat bahwa θ dan ϕ memenuhi hubungan

$$\theta = 90 - \frac{\phi}{2}$$

sehingga Persamaan (7–17) berubah menjadi

$$d = a\sin\theta \qquad (7\text{–}18)$$

Ketika elektron dipercepat dengan beda potensial $V = 54$ volt. interferensi maksimum akan terjadi pada $\phi = 50°$. Dengan menggunakan **Persamaan (7–18)**, nilai λ akan diperoleh untuk jarak antara atom nikel $a = 0{,}215$ nm. Jika dibandingkan dengan nilai λ yang diperoleh berdasarkan teori **de Broglie** akan menghasilkan nilai panjang gelombang yang sama.

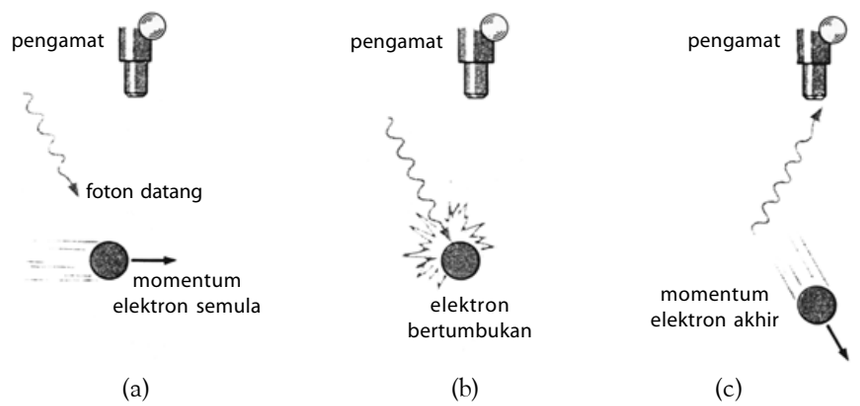
Dengan demikian, perhitungan panjang gelombang yang dilakukan oleh **Davisson-Germer** menurut percobaan sama dengan panjang gelombang berdasarkan teori **de Broglie**. **Davisson-Germer** berhasil menunjukkan bahwa materi memiliki sifat gelombang. Percobaan-percobaan untuk membuktikan keberadaan partikel terus berkembang. Salah satu contohnya adalah pola-pola difraksi yang terjadi sebagai akibat berkas elektron yang dijatuhkan pada kristal aluminium. Penemuan sifat gelombang partikel selanjutnya melahirkan suatu kajian baru dalam fisika, yang disebut mekanika gelombang.

Pada masa sekarang, sifat gelombang yang dimiliki partikel telah banyak dimanfaatkan. Sifat-sifat bahan diselidiki dengan melihat pola difraksi elektron yang dijatuhkan pada bahan tersebut. Mikroskop elektron

yang digunakan oleh para ahli biologi untuk meneliti jasad mikroskopis merupakan contoh pemanfaatan sifat gelombang partikel. Mikroskop elektron dapat menghasilkan perbesaran yang sangat tinggi.

c. Prinsip Ketidakpastian Heisenberg

Apakah Anda pernah membayangkan bagaimana cara yang digunakan para fisikawan untuk mengamati elektron? Anda telah belajar tentang efek fotolistrik dan efek Compton pada materi sebelumnya. Pada pembahasan tersebut terjadi tumbukan antara foton dan elektron. Peristiwa inilah yang digunakan oleh para fisikawan untuk mengamati elektron. Foton ditembakkan ke arah elektron sehingga terjadi tumbukan antara keduanya, kemudian foton yang terpantulkan oleh elektron ini diamati oleh pengamat. Foton ini membawa informasi tentang keberadaan elektron. Akan tetapi, keberadaan elektron yang diinformasikan oleh foton tersebut bukan keberadaan foton yang sebenarnya, melainkan keberadaan elektron setelah tumbukan dengan foton. Dengan kata lain, ada ketidakpastian posisi elektron akibat tumbukan dengan foton. Prinsip ini pertama kali dikemukakan oleh **Heisenberg** dan prinsip ini dikenal dengan nama prinsip ketidakpastian Heisenberg. Untuk lebih jelasnya perhatikan gambar berikut.



Sumber: *Konsep Fisika Modern*, 1983

Gambar 7.15
Tumbukan foton dan elektron ketika mengamati elektron.

Pada peristiwa tersebut, foton memiliki momentum sebesar $\frac{h}{\lambda}$, dan jika foton bertumbukan dengan elektron, momentum awal elektron akan berubah. Perubahan yang tepat tidak bisa diramalkan, tetapi perubahan ini sebanding dengan perubahan momentum foton $\frac{h}{\lambda}$. Jadi, pengukuran tersebut telah menyebabkan ketidakpastian sebesar $\Delta p \approx \frac{h}{\lambda}$.

Oleh karena ketidakpastian pengukuran posisi elektron sekurang-kurangnya sama dengan panjang gelombang yang digunakan, yaitu $\Delta x \geq \lambda$. Ketidakpastian momentum dan posisinya adalah

$$\Delta p \, \Delta x \geq h \qquad (7\text{–}19)$$

Jadi, di dalam teori Relativistik, posisi dan momentum suatu partikel tidak dapat ditentukan tepat secara bersamaan. Semakin besar ketepatan posisi partikel, semakin besar ketidakpastian momentumnya. Sebaliknya, semakin besar ketepatan harga momentumnya, semakin kecil ketepatan posisinya. Berbeda dengan teori klasik, posisi dan momentum suatu partikel dapat ditentukan secara tepat dan bersamaan.

Kata Kunci

- gelombang partikel
- efek fotolistrik
- foton
- fungsi kerja
- efek Compton
- panjang gelombang de Broglie
- jarak antara bidang
- prinsip ketidakpastian Heisenberg

Tes Kompetensi Subbab B

Kerjakanlah pada buku latihan.

1. Logam cesium memiliki fungsi kerja 1,80 eV.
 a. Berapa panjang cahaya gelombang terpanjang yang dapat dijatuhkan pada permukaan logam cesium tanpa mengeluarkan elektron dari permukaan logam?
 b. Jika permukaan logam disinari oleh cahaya monokromatik dengan panjang gelombang 450 nm, hitunglah energi kinetik maksimum elektron foto yang keluar dari permukaan logam.
 c. Berapakah potensial henti yang menahan keluarnya arus elektron?
2. Cahaya dengan panjang gelombang 50 nm meradiasi permukaan logam yang memiliki fungsi kerja $0{,}3 \times 10^{-18}$ joule. Jika $c = 3 \times 10^8$ m/s dan $h = 6{,}6 \times 10^{-34}$ Js, tentukan:
 a. energi kinetik maksimum elektron fotonya;
 b. potensial henti.
3. Suatu berkas sinar-X dengan energi 17,2 k eV mengalami hamburan Compton dengan sudut 90°. Tentukan energi foton sinar-X sesudah hamburan.
 (Penuntun: energi foton dirumuskan oleh $E = h\frac{c}{\lambda}$)
4. Sebuah foton memiliki panjang gelombang 0,070 nm mengalami hamburan Compton dengan sudut 60°. Tentukanlah:
 a. panjang gelombang;
 b. energi foton yang dihamburkan;
 c. energi yang diberikan kepada elektron yang melompat.
5. Sebuah partikel bergerak dengan kecepatan 2×10^6 m/s. Berapakah panjang gelombang partikel jika partikel tersebut:
 a. elektron;
 b. proton;
 c. bola bermassa 0,4 kg?
6. Berapakah panjang gelombang foton agar momentumnya sama dengan momentum elektron yang bergerak dengan kecepatan 2×10^8 m/s?
7. Sebutkanlah gagasan yang dikemukakan oleh de Broglie.
8. Hitunglah panjang gelombang de Broglie yang dimiliki oleh elektron yang bergerak dengan laju 5×10^6 m/s.
9. Sebuah partikel bermassa 10^{-6} kg memiliki panjang gelombang de Broglie sebesar 20 nm. Tentukanlah kecepatan gerak partikel tersebut.
10. Sebuah partikel bergerak dengan laju $2{,}5 \times 10^5$ m/s. Hitunglah massa partikel tersebut jika panjang gelombang de Broglie yang dimiliki partikel itu 500 nm.

Rangkuman

1. Radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh benda disebut radiasi termal.
2. Benda hitam adalah suatu sistem yang dapat menyerap semua radiasi kalor yang mengenai benda atau sistem tersebut.
3. Menurut Stefan-Boltzmann, intensitas radiasi termal suatu benda dinyatakan dengan $I = e\,\sigma\,T^4$.
4. Hukum Pergeseran Wien menyatakan bahwa panjang gelombang yang suhunya tinggi lebih pendek daripada panjang gelombang intensitas benda yang suhunya rendah. Secara matematis, Hukum Pergeseran Wien dinyatakan sebagai berikut.
 $$\lambda_{\text{maks}}\, T = \text{konstan}$$
 Teori Wien ini dapat menerangkan spektrum pada panjang gelombang yang pendek, tetapi menyimpang ketika menerangkan panjang gelombang yang panjang.
5. Rayleigh-Jeans memperoleh perumusan bahwa intensitas radiasi berbanding terbalik dengan pangkat empat panjang gelombang.
6. Teori Rayleigh-Jeans ini dapat menerangkan spektrum pada panjang gelombang yang panjang, tetapi menyimpang ketika menerangkan panjang gelombang yang pendek.
7. Menurut Teori Planck, energi radiasi yang dipancarkan oleh getaran molekul benda merupakan paket (kuanta) energi yang besarnya
 $$E_n = n\,h\,f$$
 Energi untuk satu foton adalah sebesar
 $$E = h\,f$$
8. Efek fotolistrik adalah gejala terlepasnya elektron-elektron dari permukaan plat logam ketika disinari dengan frekuensi tertentu. Persamaan yang berlaku pada gejala ini adalah
 $$h\,f = W + E_k$$
 dengan $W = h\,f_0$ adalah fungsi kerja elektron pada logam.
 Fungsi kerja adalah energi minimum yang dibutuhkan elektron agar terlepas dari ikatan inti atom pada logam.
9. Efek Compton menjelaskan bahwa ketika foton menumbuk elektron, foton memberikan energi pada elektron. Kehilangan energi pada foton ditandai dengan mengecilnya frekuensi foton atau bertambah panjangnya panjang gelombang foton. Momentum yang dimiliki foton adalah
 $$p = m\,c = \frac{h\,f}{c} \quad \text{atau} \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

10. Dengan menggunakan Hukum Kekekalan Energi dan Hukum Kekekalan Momentum dalam dinamika relativistik, didapatkan persamaan hamburan Compton sebagai berikut.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

11. Sifat gelombang pada partikel pertama kali dikenalkan oleh Louis de Broglie. Menurut dia, panjang gelombang partikel (panjang gelombang de Broglie) adalah

$$d = a \sin \theta$$

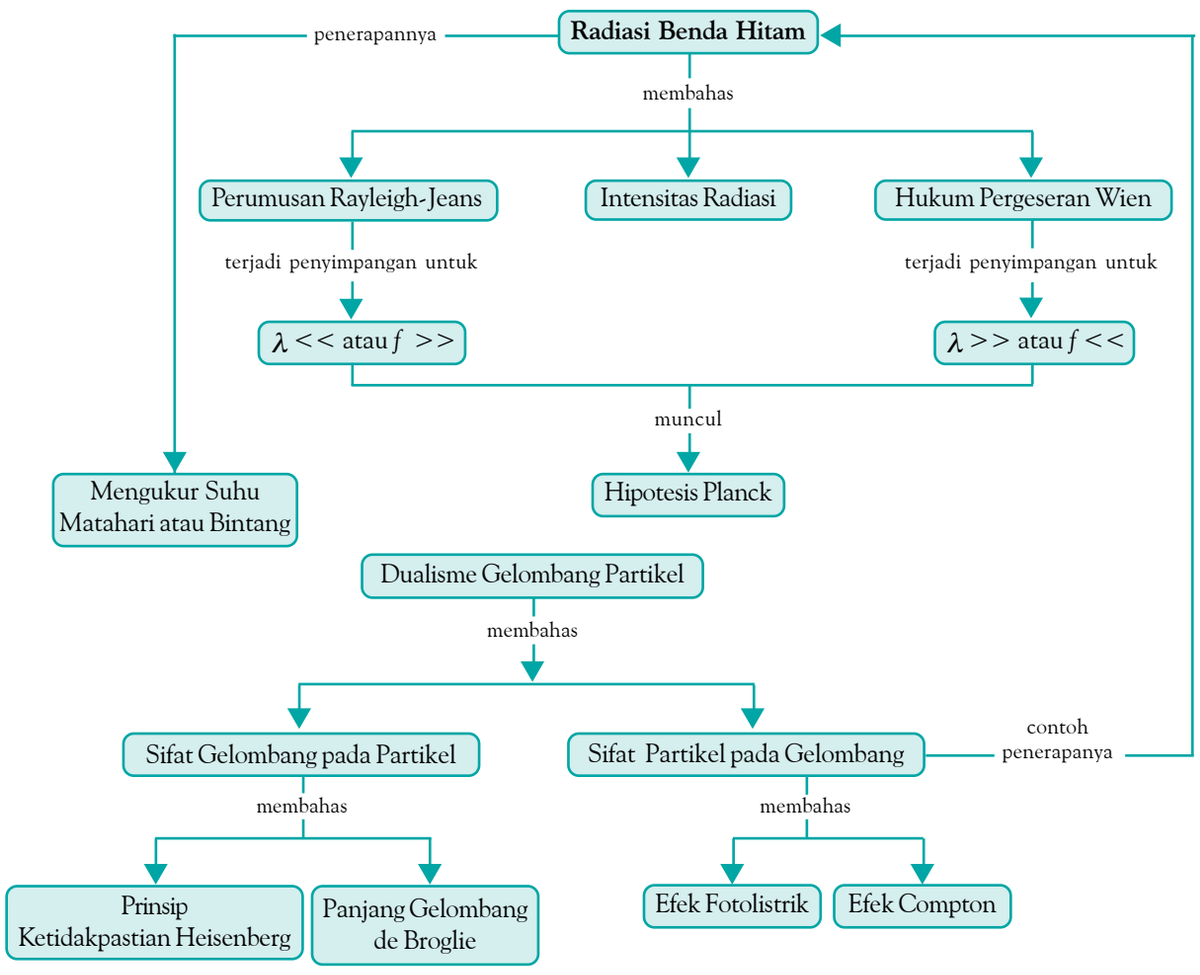
12. Prinsip ketidakpastian elektron menggambarkan bahwa informasi tentang elektron keberadaannya tidak pasti. Besarnya ketidakpastian sebesar

$$\Delta p \approx \frac{h}{\lambda}$$

Oleh karena ketidakpastian pengukuran elektron sekurang-kurangnya sama dengan panjang gelombang yang digunakan, yaitu $\Delta x \geq h$. Ketidakpastian momentum dan posisinya adalah

$$\Delta x \geq \frac{h}{\lambda} \quad \text{atau} \quad \Delta p \, \Delta x \geq h$$

Peta Konsep



Refleksi

Setelah mempelajari materi pada bab ini, Anda tentu dapat memahami mengenai benda hitam. Anda juga paham bahwa cahaya juga dapat bersifat seperti partikel dan partikel bisa bersifat seperti gelombang. Dari keseluruhan materi yang ada pada bab ini, bagian manakah yang Anda anggap sulit untuk dipahami? Coba Anda diskusikan dengan teman atau guru Fisika Anda. Coba Anda tuliskan juga manfaat mempelajari bab ini. Diskusikan konsep yang ada di dalamnya bersama teman Anda.

Tes Kompetensi Bab 7

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling benar.

1. Pada peristiwa efek fotolistrik, semakin besar intensitas cahaya penyinarannya, maka
 a. semakin besar energi kinetik elektron yang terlepas
 b. semakin besar kecepatan elektron yang terlepas
 c. semakin banyak elektron yang terlepas
 d. kecepatan dan jumlah elektron yang terlepas sama besar
 e. energi yang terserap oleh bahan semakin besar
2. Energi foton suatu gelombang elektromagnetik bergantung pada
 a. kecepatannya
 b. intensitasnya
 c. amplitudonya
 d. panjang gelombangnya
 e. suhunya
3. Berikut ini, yang fotonnya memiliki energi terbesar adalah
 a. sinar merah
 b. sinar ungu
 c. sinar gamma
 d. sinar-X
 e. gelombang radio
4. Besarnya panjang gelombang de Broglie dari sebuah elektron yang bergerak dengan kelajuan 0,3 c, dengan $c = 3 \times 10^8$ m/s dan massa elektron $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg adalah
 a. 0,02 Å
 b. 0,04 Å
 c. 0,06 Å
 d. 0,08 Å
 e. 0,09 Å
5. Cahaya ultraviolet yang dipergunakan untuk menyinari permukaan logam memiliki panjang gelombang 2.000 Å. Elektron yang terlepas dari permukaan logam memiliki energi kinetik sebesar 5,945 eV. Fungsi kerja dari logam tersebut adalah
 a. 0,5 eV
 b. 0,4 eV
 c. 0,3 eV
 d. 0,2 eV
 e. 0,1 eV
6. Dua keping logam diberikan beda potensial V. Elektron menumbuk anoda dengan kelajuan v. Jika massa elektron m, muatannya e, kelajuan elektron dapat dituliskan menjadi
 a. $\sqrt{\frac{2eV}{m}}$
 b. $\sqrt{\frac{2eV}{2m}}$
 c. $\sqrt{\frac{eV}{m}}$
 d. $\frac{1}{2}\sqrt{\frac{eV}{m}}$
 e. $2\sqrt{\frac{eV}{m}}$
7. Jika sebuah pemancar radio berdaya 1.000 watt memancarkan foton tiap sekonnya sebanyak 5×10^{20} buah, energi satu fotonnya adalah
 a. 2×10^{-17} J
 b. 5×10^{-17} J
 c. 2×18^{-18} J
 d. 2×10^{-20} J
 e. 5×10^{-20} J

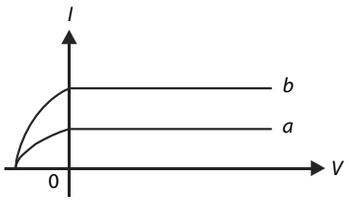
 (UMPTN 1997)
8. Permukaan logam tertentu memiliki fungsi kerja W joule. Jika konstanta Planck h joule sekon, energi maksimum foto elektron yang dihasilkan oleh cahaya berfrekuensi v Hz adalah ... joule.
 a. $W + hv$
 b. $W/(hv)$
 c. $W - hv$
 d. hv/W
 e. $hv - W$
9. Permukaan suatu logam memiliki fungsi kerja $3{,}90 \times 10^{-19}$ J disinari cahaya yang panjang gelombangnya 3.300 A. Energi kinetik foto elektron maksimum yang dihasilkan adalah
 a. $2{,}4 \times 10^{-21}$ J
 b. $1{,}2 \times 10^{-19}$ J
 c. $2{,}1 \times 10^{-19}$ J
 d. $4{,}6 \times 10^{-19}$ J
 e. $6{,}0 \times 10^{-18}$ J

 (Ebtanas 1998)
10. Panjang gelombang suatu foton 5×10^3 Å mengenai suatu permukaan logam yang energi ambangnya 2 eV. Jika $c = 3 \times 10^8$ m/s dan $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ joule sekon, besar energi kinetik foto elektron adalah
 a. $6{,}78 \times 10^{-20}$ joule
 b. $6{,}87 \times 10^{-20}$ joule
 c. $7{,}78 \times 10^{-20}$ joule
 d. $8{,}68 \times 10^{-20}$ joule
 e. 9×10^{-20} joule

 (Ebtanas 1990)
11. Jika sinar ungu memiliki frekuensi 10^{16} Hz dijatuhkan pada permukaan logam yang memiliki energi ambang $\frac{2}{3}$ kali kuantum energi sinar ungu dan tetapan Planck $= 6{,}6 \times 10^{-34}$ joule sekon, energi kinetik elektron yang dilepas adalah
 a. $1{,}1 \times 10^{-18}$ joule
 b. $2{,}2 \times 10^{-18}$ joule
 c. $3{,}3 \times 10^{-18}$ joule
 d. $4{,}4 \times 10^{-18}$ joule
 e. $6{,}6 \times 10^{-18}$ joule
12. Frekuensi ambang natrium $4{,}4 \times 10^{14}$ Hz. Besarnya potensial penghenti dalam volt bagi natrium saat disinari dengan cahaya yang frekuensinya $6{,}0 \times 10^{14}$ Hz adalah
 a. 0,34 V
 b. 0,40 V
 c. 0,44 V
 d. 0,66 V
 e. 0,99 V

 (UMPTN 1999)
13. Seberkas sinar dengan $f = 10^{15}$ Hz jatuh pada logam. Fungsi kerja logam $2{,}9 \times 10^{-19}$ J, maka potensial henti (*stopping potential*) dari elektron ($h = 6{,}6 \times 10^{-34}$ Js, $m_e = 9{,}1 \times 10^{-31}$ kg, $q_e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C), adalah
 a. 4,14 V
 b. 2,31 V
 c. 1,81 V
 d. 3,73 V
 e. 4,98 V

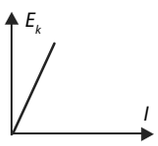
14. Pada gejala fotolistrik diperoleh grafik hubungan I (kuat arus) yang timbul terhadap V (tegangan listrik) seperti pada gambar. Upaya yang dilakukan agar grafik a menjadi grafik b adalah

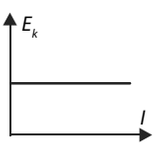


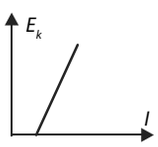
a. mengurangi intensitas sinarnya
b. menambah intensitas sinarnya
c. menaikkan frekuensi sinar
d. menurunkan frekuensi sinar
e. mengganti logam yang disinari

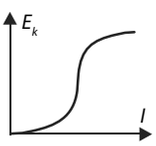
(UMPTN 1994)

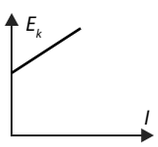
15. Grafik yang menunjukkan hubungan antara energi kinetik elektron foto (E_k) dan intensitas (I) foton pada proses fotolistrik adalah

a. 

d. 

b. 

e. 

c. 

(UMPTN 1995)

16. Jika tetapan Planck = 6,60 × 10^{-34} Js, panjang gelombang de Broglie suatu elektron yang bergerak dengan kelajuan $\frac{1}{9,1} \times 10^8$ m/s adalah

a. $6,6\times10^{-47}$ Å
b. $6,6\times10^{-2}$ Å
c. $6,6\times10^{-1}$ Å
d. 6,6 Å
e. 66 Å

(Ebtanas 2000)

17. Cahaya kuning memiliki panjang gelombang 6.600 Å. Jika tetapan Planck = 6,60 × 10^{-34} Js dan kelajuan cahaya dalam ruang hampa adalah 3 × 10^8 m/s, momentum foton cahaya kuning adalah

a. 10^{-45} kg m/s
b. 10^{-41} kg m/s
c. 10^{-36} kg m/s
d. 10^{27} kg m/s
e. 10^{19} kg m/s

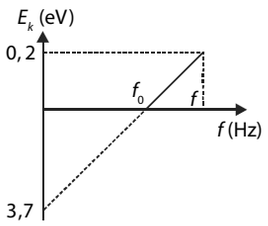
(Ebtanas 2000)

18. Sebuah elektron dipercepat oleh suatu beda potensial V. Jika e = muatan elektron, m = massa elektron, dan h = konstanta Planck, maka panjang gelombang de Broglie elektron ini dapat dinyatakan dengan rumus

a. $\lambda = \frac{h}{\sqrt{meV}}$
b. $\lambda = \frac{2h}{\sqrt{meV}}$
c. $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meV}}$
d. $\lambda = \frac{h}{2\sqrt{meV}}$
e. $\lambda = \frac{3h}{\sqrt{2meV}}$

(UMPTN 1993)

19. Grafik berikut menunjukkan hubungan energi kinetik maksimum elektron (E_k) terhadap frekuensi foton (f) pada efek fotolistrik.

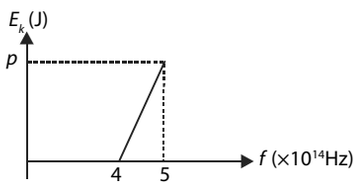


Jika konstanta Planck = $6,6\times10^{-34}$ Js dan 1 eV = $1,6\times10^{-19}$ joule, besar f adalah

a. 48×10^{14} Hz
b. 21×10^{14} Hz
c. 14×10^{14} Hz
d. $9,5 \times 10^{14}$ Hz
e. $8,9 \times 10^{14}$ Hz

(UMPTN 1996)

20. Gambar berikut adalah grafik hubungan E_k (energi kinetik maksimum) foto elektron terhadap f (frekuensi) sinar yang digunakan pada efek fotolistrik.

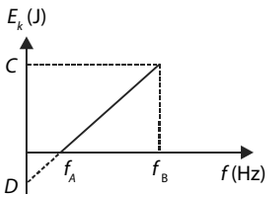


Nilai pada grafik tersebut adalah....

a. $2,64 \times 10^{-33}$ J
b. $3,30 \times 10^{-33}$ J
c. $6,60 \times 10^{-20}$ J
d. $2,64 \times 10^{-19}$ J
e. $3,30 \times 10^{-19}$ J

(UMPTN 1999)

21. Hubungan energi kinetik elektron dan frekuensi penyinaran pada gejala fotolistrik terlihat pada grafik seperti gambar.



Apabila konstanta Planck = h, besarnya fungsi kerja logam adalah

a. $0{,}25\ hf_A$
b. $0{,}5\ hf_A$
c. hf_A
d. $0{,}5\ hf_B$
e. hf_B

(UMPTN 1994)

22. Sebuah elektron yang diperkecil pada beda potensial 18 kV pada tabung hampa udara akan menimbulkan panjang gelombang minimum sebesar

a. $4{,}8 \times 10^{-12}$ m
b. $6{,}6 \times 10^{-12}$ m
c. $7{,}2 \times 10^{-12}$ m
d. $8{,}0 \times 10^{-12}$ m
e. $9{,}1 \times 10^{-12}$ m

(UMPTN 1997)

23. Jika dari keadaan diamnya elektron pertama dipercepat oleh benda potensial V_1 dan elektron lain dengan beda potensial V_2, perbandingan panjang gelombang de Broglie elektron-elektron tersebut untuk beda potensial berorde kV adalah

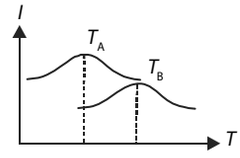
a. $\frac{V_2}{V_1}$
b. $\frac{V_1}{V_2}$
c. $\frac{V_1}{(2V_2)}$
d. $\sqrt{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}$
e. $\sqrt{\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}$

24. Jika dari keadaan diam elektron dipercepat berturut-turut oleh beda potensial $V_1 = 100$ volt dan $V_2 = 400$ volt, perbandingan panjang gelombang de Broglienya adalah

a. $\frac{1}{4}$
b. $\frac{1}{2}$
c. $\frac{3}{4}$
d. 2
e. 4

(UMPTN 1996)

25. Dari grafik berikut, hubungan antara intensitas energi (I) yang dipancarkan oleh permukaan benda terhadap panjang gelombang (λ) yang dipancarkan adalah



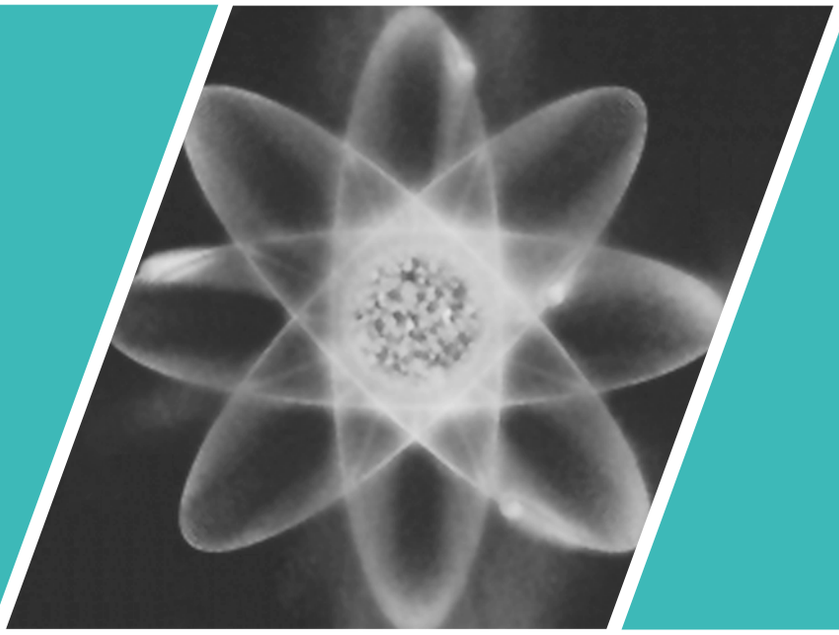
a. $T_A = T_B$ dan $\lambda_A < \lambda_B$
b. $T_A < T_B$ dan $\lambda_A < \lambda_B$
c. $T_A > T_B$ dan $\lambda_A < \lambda_B$
d. $T_A < T_B$ dan $\lambda_A > \lambda_B$
e. $T_A > T_B$ dan $\lambda_A > \lambda_B$

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan tepat.

1. Energi kinetik elektron yang terlepas dari permukaan logam sebesar 1 eV. Apabila cahaya penyinaran dari luar yang dipergunakan memiliki frekuensi 10^{15} Hz, berapakah frekuensi penyinaran yang diperlukan supaya energi kinetik elektron menjadi 2 eV?
2. Foton dari gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang 300 Å menumbuk sebuah elektron dalam ruang hampa. Setelah tumbukan, foton terpantul dengan arah 60° terhadap arah semula, tentukanlah:
 a. panjang gelombang foton setelah bertumbukan;
 b. energi foton setelah bertumbukan.
3. Pada sebuah mikroskop elektron, elektron dilewatkan pada medan listrik dengan beda potensial 55,2 eV. Jika diketahui massa elektron $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg dan muatan elektron $1{,}6 \times 10^{-19}$ coulomb, tentukanlah:
 a. kecepatan elektron saat menumbuk anoda;
 b. panjang gelombang elektron.
4. Pada saat foton menumbuk sebuah elektron, foton tersebut berbalik arah dari arahnya semula. Apabila panjang gelombang foton mula-mula 1,52Å, tentukanlah:
 a. panjang gelombangnya setelah bertumbukan;
 b. energi foton yang hilang pada saat bertumbukan.
5. Tentukanlah besarnya energi per detik yang dipancarkan oleh sebuah bola api berpijar dengan diameter 2 cm dan suhu permukaan bola api tersebut 800 K. Diketahui koefisien emisivitasnya = 1.
6. Fungsi kerja sebuah logam natrium adalah 2,3 eV. Tentukan panjang gelombang maksimum cahaya yang dapat menyebabkan terjadinya efek fotoelektron.
7. Pada suatu peristiwa fotolistrik, elektron terlepas dari permukaan logam dengan kelajuan v pada saat frekuensi sinar yang dipakai menyinari logam tersebut f. Tentukanlah kelajuan elektron yang keluar dari permukaan logam jika frekuensi sinar luar dijadikan $2f$.
8. Sebuah foton dengan panjang gelombang 0,8 Nm menambah elektron diam. Foton dihamburkan dengan sudut simpangan 120° dari arah semula. Tentukan panjang gelombang foton setelah tumbukan.
9. Partikel dapat bersifat sebagai gelombang, dengan sendirinya elektron akan dapat menunjukkan sifat-sifat interferensi atau difraksi jika dilewatkan pada suatu kisi. Buktikan bahwa elektron dapat menunjukkan sifat-sifat tersebut, sebagaimana halnya suatu gelombang.
10. Apabila fungsi kerja suatu logam adalah 1,5 eV, berapakah panjang gelombang penyinaran yang diperlukan oleh logam tersebut supaya energi kinetik elektron yang dapat dilepaskan dari permukaan logam tersebut sebesar 0,5 eV?

Bab

8



Sumber: *Chemistry: Matter and Its Changes*, 2003

Atom terdiri atas proton dan neutron yang terletak pada inti serta elektron yang mengorbit pada kulit.

Fisika Atom

Hasil yang harus Anda capai:

menganalisis berbagai besaran fisis pada gejala kuantum dan batas-batas berlakunya relativitas Einstein dalam paradigma Fisika Modern.

Setelah mempelajari bab ini, Anda harus mampu:

membuat ulasan tentang perkembangan teori atom

Anda pasti pernah mendengar tentang atom. Atom merupakan bahan dasar penyusun semua zat yang ada di alam ini, tetapi atom bukan partikel terkecil karena masih ada partikel-partikel subatomik. Tahukah Anda tujuan para ilmuwan mempelajari atom? Untuk menjawab pertanyaan tersebut, Anda harus menjawab terlebih dahulu pertanyaan-pertanyaan berikut. Apakah Anda tahu tentang serat optik yang banyak digunakan dalam dunia telekomunikasi sekarang ini? Apakah Anda tahu bahan apa yang digunakan sebagai rangka pesawat ulang-alik? Dengan mempelajari seluk beluk atom, para ilmuwan dapat memodifikasi unsur-unsur sehingga memiliki sifat yang diharapkan.

Pada bab ini, Anda akan mempelajari evolusi model atom dan atom berelektron banyak. Materi ini merupakan dasar pengetahuan untuk belajar dan mengaplikasikan teknologi tentang fisika material.

A. Evolusi Model Atom

B. Atom Berelektron Banyak

Tes Kompetensi Awal

Sebelum mempelajari konsep Fisika Atom, kerjakanlah soal-soal berikut dalam buku latihan.

1. Sebutkan komponen penyusun sebuah atom dan jelaskan kedudukan tiap komponen tersebut dalam atom.
2. Sebutkan dan jelaskan model-model atom yang pernah ada mulai dari awal sampai model yang terbaru.
3. Sebutkan nama-nama kulit tempat elektron mengorbit dalam atom dan berapa jumlah maksimum elektron yang dapat berada pada tiap kulit tersebut.
4. Coba Anda perhatikan tabel periodik unsur-unsur. Menurut Anda, bagaimanakah ukuran jari-jari atom dalam (a) satu periode dan (b) satu golongan.



Tokoh

John Dalton
(1766–1844)



John Dalton adalah seorang ilmuwan Inggris. Dia orang pertama yang mengemukakan tentang teori atom berdasarkan hasil eksperimen yang dilakukan Joseph Proust. Dalton menyatakan bahwa atom adalah bagian terkecil dari benda yang tidak dapat dibagi-bagi lagi.

Sumber: *www.allbiographies.com*

A. Evolusi Model Atom

Sejak zaman dulu, manusia sudah tertarik untuk mengetahui bahan dasar penyusun seluruh material dan zat yang ada di alam ini. Landasan berpikirnya sangat sederhana, mereka mengambil analogi sebuah rumah yang dibuat dari batu dan kayu, kemudian batu tersebut disusun oleh partikel-partikel batu yang lebih kecil, dan seterusnya. Akhirnya, mereka sampai pada kesimpulan bahwa bahan semua material dan zat yang ada di alam itu disusun oleh suatu bahan dasar.

1. Model Atom Demokritus

Ide tentang keberadaan bahan dasar ini kali pertama dikemukakan oleh **Leucippus** (lahir tahun 490 SM). Kemudian, **Demokritus** (470–380 SM) mengembangkan pendapat **Leucippus** dengan memberi nama *atomos* untuk bahan dasar ini. Nama ini diambil dari bahasa Yunani yang berarti tidak dapat dibagi lagi. Jadi, **Demokritus** menyatakan bahwa semua material dan zat yang ada di alam ini disusun oleh bagian terkecil yang tidak dapat dibagi lagi, yaitu atom.

Pada masa tersebut, banyak para filsuf yang mengemukakan pendapatnya mengenai atom. Argumentasi yang mereka gunakan bukan didasarkan pada hal percobaan, melainkan berdasarkan logika. Walaupun "penemuan" mereka ini sebatas teori, tetapi hal ini telah menjadi tonggak penting untuk pekembangan teori fisika atom dan fisika inti. Seiring dengan perkembangan zaman, banyak fisikawan dan kimiawan yang tertarik untuk mempelajari teori atom ini terus membuat evolusi model atom sehingga didapatkan model atom seperti sekarang ini.

2. Model Atom Dalton

John Dalton (1766–1844) adalah seorang ilmuwan Inggris yang kali pertama menyatakan teori tentang atom berdasarkan hasil eksperimen yang dilakukan **Joseph Proust**, seorang kimiawan dari Prancis, yang menyatakan bahwa senyawa disusun oleh unsur-unsur dengan perbandingan tetap. Hasil eksperimen **Proust** ini disebut Hukum Perbandingan Tetap. Pada 1799, **Proust** melakukan eksperimen dengan mereaksikan unsur hidrogen dan unsur oksigen. Ia menemukan senyawa air dengan perbandingan tetap, yaitu 1:8. Agar Anda lebih jelas, perhatikan tabel berikut.

Tabel 8.1
Eksperimen Perbandingan Tetap Proust

Massa Hidrogen yang Direaksikan (gram)	Massa Oksigen yang Direaksikan (gram)	Massa Air (gram)	Sisa Hasil Reaksi (gram)
1	8	9	0
1	9	9	1 gram oksigen
2	8	9	1 gram hidrogen
2	16	18	0

Selain hasil eksperimen Proust, eksperimen lain yang dijadikan acuan oleh Dalton dalam membuat teori atomnya adalah eksperimen yang dilakukan oleh **Antoine Lavoisier** dan **Preistley**. Pada 1774, dua orang kimiawan itu melakukan eksperimen dengan memanaskan merkuri oksida yang dihubungkan dengan udara di wadah tertutup. Hasil eksperimen menujukkan massa sebelum reaksi dan sesudah reaksi adalah sama. Pernyataan ini dikenal sebagai Hukum Lavoisier.

Dua hasil eksperimen ini membuat **Dalton** mempercayai tentang keberadaan atom. Jika suatu unsur terdiri dari bahan dasar yang tidak kontinu, tidak mungkin ada perbandingan tetap unsur-unsur pembentuk senyawa dan kekekalan massa. Oleh karena itu, pada 1803, Dalton mengusulkan teori atom sebagai berikut.

a. Atom merupakan bagian terkecil suatu zat yang tidak dapat dibagi-bagi lagi.
b. Setiap unsur memiliki sifat unik yang sesuai dengan sifat atom penyusunnya.
c. Dua atom atau lebih yang berasal dari unsur-unsur berlainan dapat bergabung membentuk molekul.
d. Pada suatu persenyawaan untuk membentuk molekul, jumlah massa sebelum dan sesudah persenyawaan adalah sama.
e. Pada suatu persenyawaan, unsur-unsur pembentuknya selalu berada dalam perbandingan tetap dan sederhana.

3. Model Atom Thomson

Pada akhir abad XIX, **Thomas Alva Edison** berhasil menemukan fenomena emisi termal dalam percobaannya untuk menciptakan bola lampu. Fenomena ini mendorong para fisikawan meneliti tentang tabung sinar katode. Tabung sinar katode terdiri atas sebuah tabung hampa (gas di dalam tabung di pompa keluar sampai tekanan gas sekitar 0,01 mmHg), satu elektrode negatif (katode), dan satu elektroda positif (anode). Ketika elektrode dihubungkan dengan sumber tegangan tinggi (5kV–50kV) akan diemisikan suatu partikel yang bergerak menuju anode. Dari hasil penelitian, diketahui bahwa partikel yang diemisikan katode ini bermuatan negatif.

Pada 1897, seorang fisikawan Inggris bernama **Joseph John Thomson** melakukan kembali eksperimen tentang tabung sinar katode, tetapi dengan beberapa modifikasi. Untuk lebih jelasnya, Anda bisa melihat **Gambar 8.1** berikut.



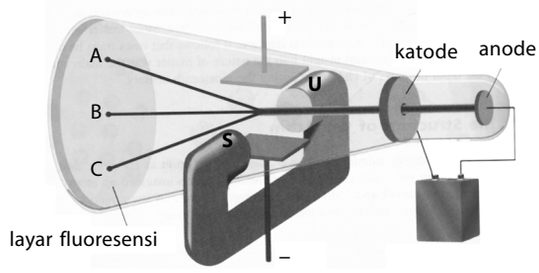
Tokoh

Sir J.J. Thomson
(1856–1940)



Thomson adalah seorang ahli Fisika yang lahir di Checham Hill, Greater Manchester, Inggris. Dia belajar di Cambridge dan meraih gelar profesor pada 1884. Dia meraih hadiah Nobel Fisika tahun 1906. Eksperimennya yang terkenal tentang tabung sinar katode. Dari eksperimennya, dia menemukan nilai nisbah *e*/*m*.

Sumber: *www.allbiographies.com*



Gambar 8.1
Percobaan Thomson

Gambar 8.1 menunjukkan pada bagian tengah tabung sinar katode diberi medan listrik dan medan magnet yang arahnya saling tegak lurus (*cross field*), yaitu medan listrik berarah ke bawah (pada gambar) dan medan magnet berarah ke dalam kertas (pada gambar). Tahapan-tahapan eksperimen yang dilakukan oleh **Thomson** adalah sebagai berikut.

1) Ketika $E = 0$ dan $B = 0$, partikel sinar katode bergerak lurus.
2) Ketika medan listrik diaktifkan, sinar katode bergerak ke atas. Hal ini disebabkan gaya elektrostatis antara partikel bermuatan negatif dan pelat kutub positif.
3) Dengan tetap menjaga besar E, medan magnet diaktifkan. Sesuai dengan kaidah tangan kanan, arah gaya Lorentz adalah ke bawah. Dengan mengatur besarnya B, sinar katode tersebut akan bergerak lurus kembali.

Dari eksperimen tersebut, **Thomson** mendapatkan perhitungan matematis sebagai berikut.

1) Kelajuan partikel dalam tabung sinar katode didapatkan dari perubahan energi potensial listrik menjadi energi kinetik partikel tersebut.

$$E_{p\ \text{listrik}} = E_{k\ \text{partikel}}$$

$$eV = \frac{1}{2}\, mv^2$$

$$\boxed{\frac{e}{m} = \frac{v^2}{2V}} \qquad (8\text{–}1)$$

Keterangan:
e = muatan partikel sinar katode
m = massa partikel sinar katode
v = kecepatan partikel sinar katode
V = beda potensial yang diberikan

2) Ketika partikel sinar katode tetap bergerak lurus walaupun diberi medan listrik E dan mendan magnet B, berarti

$$F_l = F_c$$

$$Bev = eE$$

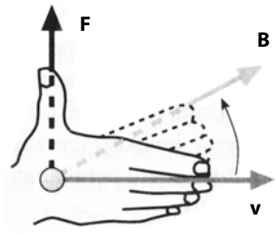
$$\boxed{v = \frac{E}{B}} \qquad (8\text{–}2)$$

Dengan mensubstitusikan **Persamaan (8–1)** ke **Persamaan (8–2)** akan didapatkan

$$\boxed{\frac{e}{m} = \frac{E^2}{2VB^2}} \qquad (8\text{–}3)$$

Ingatlah

Jika ada elektron yang bergerak dengan kecepatan **v** dalam suatu medan magnet **B**, arah gaya Lorentznya mengikuti kaidah tangan kanan.



Besaran E, V, dan B dapat diketahui dari pengukuran sehingga Thomson mendapatkan perbandingan muatan dan massa (e/m) partikel sinar katode sebagai berikut

$$\frac{e}{m} = 1{,}758803 \times 10^{11}\ \text{C/kg} \qquad (8\text{–}4)$$

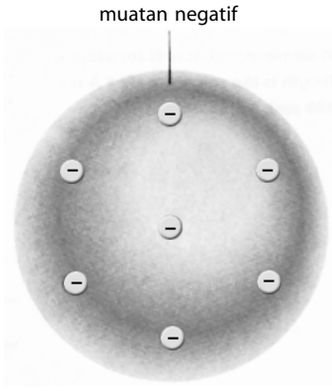
Thomson melakukan eksperimen ini berulang-ulang, yaitu dengan mengganti gas dalam pelat katode dengan unsur lainnya dan mengganti gas dalam sinar katode ini. Akan tetapi, hasil yang didapatkan **Thomson** tetap sama. Kemudian, **Thomson** menyimpulkan bahwa partikel sinar katode ini merupakan bahan yang ada di setiap zat. **Thomson** memberi nama partikel ini *corpuscles*, tetapi partikel ini lebih dikenal dengan nama *elektron*.

Nah, apakah Anda tahu mengapa **Thomson** menyimpulkan bahwa elektron ini bagian dari atom? Mengapa ia tidak menyimpulkan bahwa elektron ini adalah atom, atau dengan kata lain atom bermuatan negatif? Ada dua alasan yang mendasari kesimpulan **Thomson**, yaitu sebagai berikut.

1) Konsep dasar tentang atom yang menyatakan bahwa atom itu netral.
2) Saat itu, fisikawan telah mengetahui massa dari atom hidrogen yang merupakan atom teringan dari eksperimen tentang elektrolisis. Ternyata, nilai e/m jauh lebih kecil (sekarang telah terbukti rasionya adalah 1 : 1.836,15) dari massa atom hidrogen.

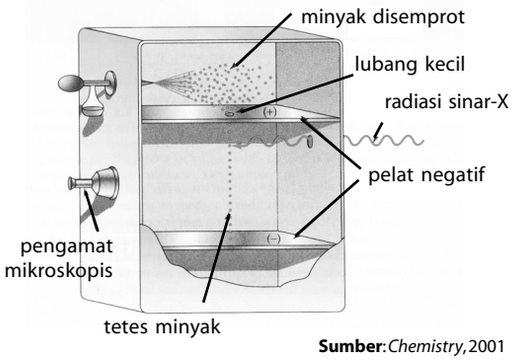
Atas dasar itulah, **Thomson** mengusulkan sebuah model atom yang dikenal dengan model atom kue kismis, yaitu sebagai berikut.

1) Atom berbentuk bulat padat dengan muatan positif tersebar ke seluruh bagian bola tersebut.
2) Muatan positif ini dinetralkan oleh muatan negatif yang melekat pada permukaan bola tersebut.



Gambar 8.2
Model Atom Thomson

Keberhasilan **Thomson** menemukan salah satu kepingan "puzzle" atom ini memberikan inspirasi bagi fisikawan lainnya melakukan eksperimen tetes minyak yang dilakukan oleh **Robert A. Millikan**, seorang fisikawan dari Amerika Serikat. Eksperimen tetes minyak Millikan ini berhasil mendapatkan besarnya muatan dan massa dari elektron. Untuk lebih jelasnya, silahkan Anda perhatikan **Gambar 8.3** berikut.



Sumber: *Chemistry*, 2001

Gambar 8.3
Percobaan tetes minyak Millikan

Seperti diperlihatkan pada **Gambar 8.3**, **Millikan** bereksperimen dengan menyemprotkan minyak ke dalam sebuah tabung atau kotak. Kotak tersebut memiliki dua pelat bermuatan, yaitu pelat positif pada bagian atas dan pelat negatif pada bagian bawah. Minyak yang disemprotkan tersebut (pada bagian atas pelat positif) membentuk tetesan

karena pengaruh gaya berat. Tetesan tersebut jatuh ke bawah melewati sebuah lubang kecil pada pelat positif. Di sini tetesan minyak disinari dengan sinar-X supaya tetesan tersebut bermuatan negatif. Oleh karena pelat tersebut belum diberi muatan, tetesan minyak tersebut terus bergerak ke bawah.

Selain gaya berat, pada tetesan minyak tersebut bekerja juga gaya Stokes dan gaya Archimedes (ingat kembali materi tentang fluida di Kelas XI). Jadi, secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut.



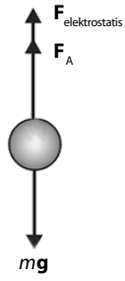
Gambar 8.4
Gaya berat, gaya Archimedes, dan gaya stokes bekerja pada tetesan minyak pada percobaan Millikan.

$$mg = \rho_u g V + 6\pi r \eta v \qquad (8\text{–}5)$$

Oleh karena tetesan minyak diasumsikan berbentuk bola, **Persamaan (8–5)** dapat dituliskan menjadi:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_m g = \frac{4}{3}\pi r^3 \ \rho_u g V + 6\pi r \eta v \qquad (8\text{–}6)$$

Keterangan:
ρ_m = massa jenis minyak
ρ_u = massa jenis udara
r = jari-jari tetesan minyak
v = volume tetesan minyak
η = viskositas udara



Gambar 8.5
Tetesan minyak berada dalam kesetimbangan karena adanya gaya berat, gaya Archimedes, dan gaya elektrostatis.

Walaupun ada gaya Stokes dan gaya Archimedes, tetesan minyak tetap bergerak ke bawah karena gaya beratnya lebih besar. Sebelum tetesan minyak tersebut sampai di pelat negatif, beda potensial diaktifkan sehingga muncul gaya elektrostatis ke atas antara tetesan minyak dan pelat positif. Jika beda potensial diatur, suatu saat akan terjadi kesetimbangan antara gaya berat, gaya Archimedes, dan gaya elektrostatis adalah

$$mg = \rho_u g V + qE \qquad (8\text{–}7)$$

Dengan mengeliminasikan **Persamaan (8–5)** dan **Persamaan (8–7)** akan didapatkan.

$$qE - 6\pi r \eta v = 0 \qquad (8\text{–}8)$$

$$q = \frac{6\pi r \eta v}{E} \qquad (8\text{–}9)$$

Keterangan:
q = muatan partikel
η = viskositas
v = kecepatan tetesan minyak
E = medan listrik

Dalam eksperimennya, **Millikan** mengukur langsung besarnya E dan v, tetapi untuk mendapatkan nilai viskositas, **Millikan** melakukan eksperimen terpisah.

Menurut pendapat Anda, apakah muatan partikel (q) bisa langsung didapatkan dengan menggunakan **Persamaan (8–8)**? Kendala yang dihadapi untuk menggunakan **Persamaan (8–8)** adalah panjang jari-jari (r) dari tetesan minyak tidak dapat diukur langsung. Panjang jari-jari tetesan minyak dapat diketahui dengan menggunakan **Persamaan (8–5).**

Tugas Anda 8.1

Dengan menggunakan logika dan pemahaman Anda tentang konsep gerak lurus, apakah Anda dapat menduga bagaimana Millikan mengukur kecepatan (v) dari tetesan minyak tersebut? Jelaskan dengan alasan-alasan ilmiah menurut pendapat Anda.

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \left(\rho_m - \rho_u\right)^{-9} = 6\pi\eta v$$

$$r = \left(\frac{9\eta v}{\rho_m - \rho_u}\right)^{1/2} \qquad (8\text{–}10)$$

Substitusikan **Persamaan (8–10)** ke **Persamaan (8-9)** sehingga didapatkan

$$q = \frac{6\pi\eta}{E}\left(\frac{9\eta v}{2(\rho_m - \rho_u)g}\right)^{1/2} v \qquad (8\text{–}11)$$

Oleh karena $\rho_u << \rho_m$, **Persamaan (8–11)** dapat dituliskan menjadi

$$q = \frac{6\pi\eta}{E}\left(\frac{9\eta v}{2\rho_m g}\right)^{1/2} v \qquad (8\text{–}12)$$

Setelah mengulang eksperimen tersebut beberapa kali, **Millikan** mendapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1) Besarnya muatan tetesan minyak tidak pernah bernilai lebih kecil dari $1{,}6021292 \times 10^{-19}$ C.
2) Muatan tetesannya selalu kelipatan bulat dari $1{,}6021292 \times 10^{-19}$ C.

Dari kesimpulan ini, didapatkan hasil bahwa muatan 1 elektron adalah

$$e = 1{,}6021292 \times 10^{-19}\ \text{C} = 1{,}6 \times 10^{-19}\ \text{C}$$

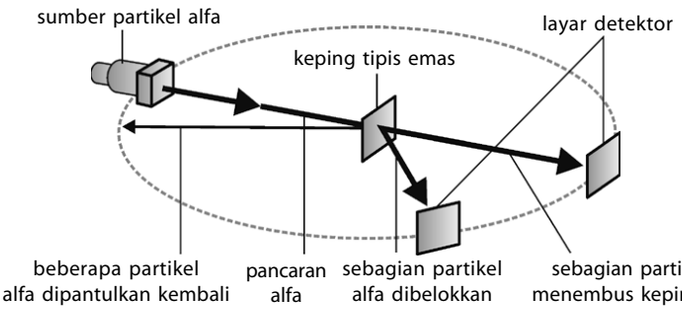
dan massanya adalah

$$\frac{e}{m} = 1{,}785804 \times 10^{11}\ \text{C/kg}$$

$$m = \frac{e}{1{,}785804 \times 10^{11}} = \frac{1{,}6 \times 10^{-19}}{1{,}785804 \times 10^{11}} = 9{,}11 \times 10\ 10^{-31}\ \text{kg}$$

4. Model Atom Rutherford

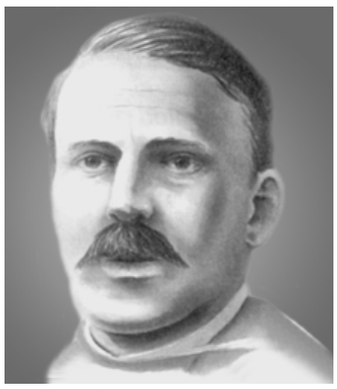
Teori atom Thomson pada 1911 diuji oleh seorang fisikawan asal Inggris, **Ernest Rutherford**. Ia menguji kebenaran teori Thomson dengan melakukan percobaan menggunakan partikel alfa yang ditembakkan pada sebuah keping logam emas yang sangat tipis. Partikel alfa adalah partikel yang dipancarkan oleh unsur radioaktif bermuatan listrik positif yang besarnya dua kali muatan elektron dan massanya empat kali massa proton. Skema percobaan Rutherford dapat Anda lihat pada **Gambar 8.6**.



Gambar 8.6
Percobaan Rutherford

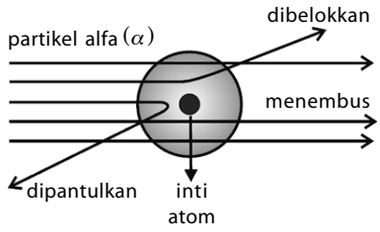
Tokoh

Ernest Rutherford
(1871–1937)



Sumber: *Science Encyclopedia*, 1998

Ernest Rutherford lahir di New Zealand pada 1871. Ia mendapat beasiswa di Universitas Cambridge, Inggris pada 1894. Di sana, ia mulai melakukan penelitian tentang radiasi elektromagnetik, tetapi kemudian perhatiannya beralih ke sinar-X dan radioaktivitas. Ia menunjukkan bahwa ada perbedaan tipe radioaktivitas, yang ia namakan radiasi alfa, beta, dan gamma. Ia mendapat hadiah Nobel untuk bidang kimia pada 1908. Pada 1911, **Rutherford** menjadi seorang profesor di Universitas Manchester, ia menemukan bahwa hampir seluruh massa atom berkumpul di inti atom.

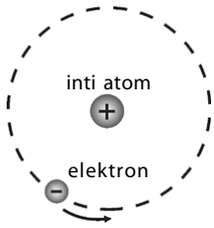


Gambar 8.7
Skema penyimpangan sinar alfa.

Rutherford memiliki asumsi bahwa jika teori atom Thomson benar, seluruh partikel alfa dengan energi yang besar harus menembus lurus keping tipis emas tersebut karena atom-atom keping logam emas netral tidak menghalangi partikel alfa yang bermuatan listrik positif. Setelah dilakukan beberapa kali percobaan, disimpulkan bahwa sebagian besar partikel alfa menembus keping logam tipis lurus mengenai layar. Akan tetapi, beberapa partikel alfa yang lainnya dibelokkan bahkan ada yang dipantulkan. Setiap sudut pembelokan dan pemantulan sinar alfa tersebut diukur dengan teliti oleh **Rutherford**.

Fakta ini kemudian dianalisis oleh **Rutherford** sebagai berikut. Berdasarkan Hukum Coulomb, partikel alfa yang bermuatan positif hanya akan dibelokkan atau dipantulkan oleh suatu muatan sejenis, yaitu muatan positif. Artinya, dalam atom logam emas harus ada muatan listrik positif dan tidak tersebar di seluruh atom, melainkan terpusat di suatu tempat sehingga menolak partikel alfa. Atas dasar fakta ini, **Rutherford** berkesimpulan sebagai berikut.

a. Muatan listrik atom dan sebagian besar massa atom terpusat di suatu titik yang disebut oleh **Rutherford** sebagai inti atom. Inti atom ini merupakan suatu daerah yang sangat kecil dengan diameter sekitar 10^{-14} m.
b. Pada jarak yang relatif jauh dari inti atom tersebut, partikel bermuatan negatif atau elektron beredar mengelilingi inti. Muatan listrik positif yang berpusat di inti atom, nilainya sama besar dengan jumlah muatan listrik negatif dari elektron-elektron yang mengelilinginya.



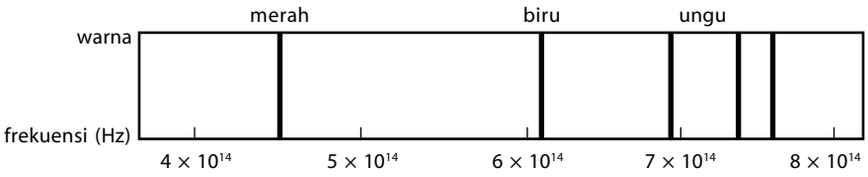
Gambar 8.8
Model atom Rutherford

Meskipun lebih baik daripada teori J.J. Thomson, namun teori atom Rutherford masih menyimpan kelemahan. Kelemahan teori atom Rutherford adalah sebagai berikut.

1) Teori atom Rutherford tidak dapat menjelaskan spektrum cahaya yang dipancarkan oleh atom hidrogen ketika gas hidrogen tersebut dipanaskan atau dimasukkan ke dalam tabung, dan diberi beda potensial listrik yang tinggi antara ujung-ujung tabung tersebut.
2) Teori atom Rutherford tidak dapat menjelaskan kestabilan atom. Berdasarkan Hukum Coulomb, elektron yang berinteraksi dengan inti atom akan mengalami gaya Coulomb yang juga berfungsi sebagai gaya sentripetal. Akibatnya, elektron mengalami percepatan (percepatan sentripetal). Menurut teori gelombang elektromagnetik yang dikemukakan oleh **Maxwell**, jika muatan (elektron) mengalami percepatan, muatan tersebut akan memancarkan gelombang elektromagnetik. Jika demikian, energi elektron berkurang dan akhirnya akan jatuh tertarik ke inti atom.

5. Spektrum Atom Hidrogen

Suatu gas yang dimasukkan ke dalam tabung dan kedua ujung tabung tersebut diberi beda potensial listrik yang tinggi, akan memancarkan cahaya. Ketika gas hidrogen dimasukkan dalam tabung pelucutan gas, kemudian dilalui oleh sinar katode maka gas hidrogen akan memancarkan cahaya. Cahaya ini kemudian dianalisis oleh *spektrometer*, yaitu sebuah alat untuk melihat dan memotret spektrum cahaya sekaligus mengukur panjang gelombangnya. Berikut ini adalah spektrum cahaya pada daerah tampak yang dipancarkan oleh gas hidrogen.



Gambar 8.9
Spektrum hidrogen pada daerah tampak

Sumber: *Konsep Fisika Modern*, 1983

Seorang guru sekolah menengah berkebangsaan Swedia, **Johannes Balmer**, mencatat bahwa kelompok panjang gelombang spektrum garis pancar hidrogen dalam daerah tampak, dapat dicocokkan secara tepat dengan rumus sebagai berikut.

$$\lambda = k\frac{n^2}{n^2 - 4} \qquad (8\text{–}13)$$

Keterangan:
n = bilangan yang bernilai mulai dari 3
k = konstanta = 364,5 nm
λ = panjang gelombang (nm)

Persamaan (8–13) dikenal sebagai rumus Balmer dan deretan garis spektrum yang cocok dengan persamaan tersebut dinamakan deret Balmer. **Rydberg** kemudian menemukan rumus serupa pada unsur alkali Li, Na, K, dan Cs. Deret Balmer untuk spektrum hidrogen ditulis dalam bilangan gelombang $v = \frac{1}{\lambda}$. Bilangan gelombang untuk deret Balmer (deret cahaya tampak) adalah

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right); \text{ dengan } n = 2, 3, 4, \ldots \qquad (8\text{–}14)$$

Keterangan:
R = konstanta Rydberg ($R = 1{,}097 \times 10^7$ m)

Panjang gelombang pada deret spektrum atom hidrogen ditampilkan dengan persamaan sebagai berikut.

1. Deret Lyman (deret ultra ungu):

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right); \text{ dengan } n = 2, 3, 4, \ldots$$

2. Deret Balmer (deret cahaya tampak):

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right); \text{ dengan } n = 3, 4, 5, \ldots$$

3. Deret Paschen (deret infra merah I):

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right); \text{ dengan } n = 4, 5, 6, \ldots$$

4. Deret Brackett (deret infra merah II):

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right); \text{ dengan } n = 5, 6, 7, \ldots$$

5. Deret Pfund (deret infra merah III):

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right); \text{ dengan } n = 6, 7, 8, \ldots$$



Tantangan untuk Anda

Diskusikanlah bersama teman Anda, apakah Anda dan teman Anda dapat **menduga** mengapa dalam eksperimennya **Rutherford** menggunakan sinar α dan lempeng emas?



Tantangan untuk Anda

Hitunglah panjang gelombang terpendek dan terpanjang untuk deret Balmer, deret Lyman, deret Pascha, deret Bracket, dan deret Pfund.

Contoh 8.1

Pada deret Lyman, jika konstanta Rydberg $R = 1{,}097 \times 10^7$ /m, hitung panjang gelombang: (a) terpanjang dan (b) terpendek.

Jawab:

Untuk deret Lyman berlaku persamaan sebagai berikut.

$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right)$; dengan $n = 1, 2, 3, \ldots$

a. Panjang gelombang terpanjang dihasilkan untuk $n = 2$

$$\frac{1}{\lambda} = 1{,}097 \times 10^7 \text{ /m}\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}\right) = 1{,}097 \times 10^7 \text{ /m}\left(\frac{3}{4}\right)$$

$$\lambda = 1{,}215 \times 10^{-7} \text{ m}$$

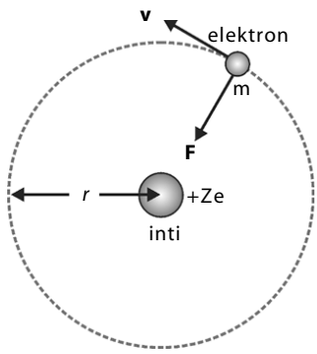
b. Panjang gelombang terpendek dihasilkan untuk $n = \sim$

$$\frac{1}{\lambda} = 1{,}097 \times 10^7 \text{ /m}\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{\sim}\right) = 1{,}097 \times 10^7 \text{ /m}$$

$$\lambda = 9{,}12 \times 10^{-8} \text{ m}.$$

6. Model Atom Bohr

Setelah **Rutherford** mengemukakan bahwa massa dan muatan positif atom terhimpun pada suatu daerah kecil di pusat atom, fisikawan asal Denmark, **Niels Bohr**, pada 1913 mengemukakan bahwa struktur atom mirip dengan sistem tata surya. Inti atom berada di pusat sistem atom dan elektron berada pada lintasan tertentu yang disebut kulit atom. Untuk menguatkan teori atom yang diusulkannya, **Bohr** menyusun dua postulat (dalil) tentang atom.



Gambar 8.10
Model atom Bohr ($Z = 1$) untuk hidrogen

1) Postulat pertama

Dalam suatu sistem atom, elektron tidak memancarkan radiasi ketika ia mengorbit inti atom. Lintasan-lintasan elektron mengorbit tanpa memancarkan radiasi dinamakan lintasan stasioner atau orbit stasioner. Postulat ini berlawanan dengan teori elektromagnetik klasik.

2) Postulat kedua

Pemancaran dan penyerapan gelombang elektromagnetik dalam suatu atom berhubungan dengan transisi elektron dari dua lintasan stasioner.

Untuk sederhananya, perhatikan **Gambar 8.10**. Model atom Bohr untuk atom hidrogen memperlihatkan bahwa sebuah elektron mengitari sebuah inti atom bermuatan positif. Jari-jari orbit lingkarannya r dan elektron bermassa m bergerak dengan laju linear tetap v. Gaya tarik Coulomb berperan memberikan percepatan sentripetal sehingga

$$F_{\text{coulomb}} = F_{\text{sentripetal}}$$

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \rightarrow \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

Oleh karena untuk atom hidrogen $Z = 1$, persamaan tersebut menjadi

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \rightarrow mv^2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r}$$

Energi kinetik elektron adalah $E_k = \frac{1}{2}mv^2$. Oleh karena $mv^2 = k\frac{e^2}{r}$, maka

$$E_k = \frac{1}{8\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r} \qquad (8\text{–}15)$$

Adapun energi potensial elektron adalah energi potensial Coulomb yang besarnya sebagai berikut.

$$E_p = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r} \qquad (8\text{–}16)$$

sehingga energi total yang dimiliki oleh elektron adalah

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{8\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r} - \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r}$$

$$E = -\frac{1}{8\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r} \qquad (8\text{–}17)$$

Keterangan:
$\varepsilon_0 = 8{,}85 \times 10^{-12}\ C^2/Nm^2$
e = muatan listrik (C)
r = jari-jari lintasan (m)

a. Jari-Jari Lintasan Stasioner

Fisika klasik meramalkan bahwa sebuah muatan elektrik yang mengalami percepatan, seperti elektron yang mengorbit dalam model atom, harus meradiasikan energi elektromagnetik secara kontinu. Ketika energi ini dipancarkan, energi total elektron menurun, dan elektron akan bergerak spiral menuju inti atom sehingga atom akhirnya jatuh ke inti atom. Untuk mengatasi kesulitan ini, **Bohr** mengusulkan gagasan orbit stasioner (postulat pertama). Dari sini **Bohr** menyimpulkan bahwa dalam keadaan ini momentum sudut orbital elektron bernilai kelipatan dari harga $\frac{h}{2\pi}$ atau ditulis $\hbar$ dengan

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \qquad (8\text{–}18)$$

Vektor momentum sudut dalam fisika klasik didefinisikan sebagai $\boldsymbol{L = r \times p}$. Untuk momentum sudut elektron yang beredar mengelilingi inti atom, r tegak lurus p sehingga persamaan momentum sudut dapat disederhanakan menjadi $L = rp = mvr$. Jadi, menurut postulat Bohr momentum sudut adalah

$$mvr = n\hbar \qquad (8\text{–}19)$$

Keterangan:
n = bilangan bulat ($n = 1, 2, 3, \ldots$)
Dengan memasukkan harga v pada **Persamaan (8–19)** ke dalam **Persamaan (8–15)**, diperoleh

$$E_k = \frac{1}{8\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r}$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{8\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r}$$

$$\frac{1}{2}m\left(\frac{n\hbar}{mr}\right)^2 = \frac{1}{8\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r}$$

$$\frac{1}{2}\frac{n^2\hbar^2}{mr^2} = \frac{1}{8\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r}$$

$$r = \frac{4\pi\varepsilon_0\hbar}{me^2} \qquad (8\text{–}20)$$

Jika $a_0 = \frac{4\pi\varepsilon_0\hbar^2}{me^2}$, didapatkan $r = a_0n^2$

Tokoh

Niels Bohr
(1885–1962)



Sumber: *Jendela Iptek*, 1997

Pada awal 1900-an, struktur atom menjadi lebih jelas, namun hukum Fisika pada saat itu tidak dapat menjelaskan mengapa elektron tidak cepat menghasilkan spiral menuju inti. **Niels Bohr**, murid **Rutherford**, membantu memecahkan misteri itu dengan menunjukkan bahwa elektron-elektron hanya diberi energi tertentu. Ia menemukan bahwa elektron-elektron yang memiliki energi terendah mengorbit paling dekat ke inti, dan elektron dengan energi tinggi mengorbit paling jauh. Pada 1913, **Niels Bohr** juga menjelaskan hubungan antara materi dan cahaya. Ia menunjukkan bahwa jika elektron berpindah dari satu tingkat energi ke tingkat energi lainnya, elektron-elektron itu mengeluarkan atau menyerap paket radiasi dalam bentuk cahaya. Paket ini dinamakan foton.

Dari **Persamaan (8–20)**, dapat diperoleh jari-jari elektron yang diperkenankan untuk setiap lintasan. Besaran a_o didefinisikan sebagai jari-jari Bohr. Untuk atom hidrogen, **Bohr** mendapatkan harga a_o = 0,0529 nm atau 0,529 angstrom. Berdasarkan teori atom Bohr ini, jari-jari orbit elektron hanya dapat bernilai a_o, $4a_o$, $9a_o$, $16a_o$, $25a_o$, dan seterusnya. Jari-jari atom, menurut teori ini tidak pernah bernilai $3a_o$ atau $4{,}5a_o$.

b. Energi Elektron Berdasarkan Teori Bohr

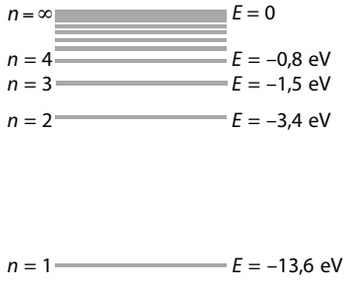
Besar energi elektron dapat diperoleh dengan menggabungkan **Persamaan (8–17)** dan **Persamaan (8–20)**, yaitu

$$E_n = -\frac{me^4}{32\pi^2\varepsilon_0^2\hbar^2}\frac{1}{n^2} \qquad (8\text{–}21)$$

Persamaan ini menyatakan bahwa energi elektron terkuantisasi. Artinya, hanya nilai-nilai energi tertentu yang diperkenankan. Jika dari persamaan tersebut semua nilai tetapnya dihitung, didapat persamaan yang lebih sederhana seperti berikut.

$$E_n = -\frac{13{,}6}{n^2}\text{eV} \qquad (8\text{–}22)$$

Pada tingkat terendah, nilai $n = 1$, energi elektron sebesar –13,6 eV dan beredar pada jari-jari Bohr 0,529 Å. Tingkat energi elektron pada keadaan yang lebih tinggi ditunjukkan pada **Gambar 8.11.**



Gambar 8.11
Tingkat-tingkat energi atom hidrogen.

Pada elektron dan inti atom yang terpisah sangat jauh, yaitu untuk $n = \infty$, diperoleh $E = 0$. Jika elektron itu bertransisi atau berpindah dari lintasan luar ke lintasan dalam sehingga ia berada pada orbit tertentu dalam lintasan n tertentu, elektron akan memiliki harga energi lebih kecil daripada keadaan semula ($E = 0$). Pada keadaan tersebut, akan dipancarkan energi sebesar E_n. Sebaliknya, jika elektron pada keadaan n, elektronnya dapat dibebaskan dari ikatan inti dengan memberinya energi sebesar E_n. Energi ini dikenal dengan energi ikat keadaan n. Jika energi yang dibebaskan melebihi energi ikat, kelebihan energi dapat muncul sebagai energi kinetik elektron yang kini telah bebas dan tidak terikat lagi pada inti atom.

Bohr mempostulatkan bahwa meskipun elektron tidak memancarkan radiasi elektromagnetik ketika beredar pada suatu tingkat tertentu, elektron dapat berpindah dari suatu keadaan energi tertentu ke keadaan energi yang lain. Selisih energi antara dua keadaan tersebut muncul sebagai sebuah radiasi gelombang elektromagnetik berenergi hf. Artinya, jika elektron berpindah dari keadaan awal ke keadaan akhir, akan terjadi pancaran atau penyerapan radiasi elektromagnetik. Frekuensi gelombang elektromagnetik yang diserap atau dipancarkan dari dua keadaan stasioner adalah

$$hf = |E_i - E_f| \qquad (8\text{–}23)$$

Keterangan:
E_i = energi mula-mula (J)
h = konstanta Planck = $6{,}626 \times 10^{-34}$ Js
E_f = energi akhir (J)
f = frekuensi radiasi gelombang elektromagnetik (Hz)



Pembahasan Soal

Dalam model atom Bohr, energi yang dibutuhkan oleh elektron hidrogen untuk pindah dari orbit dengan bilangan kuantum 1 ke 3 adalah
a. 1,50 eV
b. 1,90 eV
c. 2,35 eV
d. 12,10 eV
e. 13,60 eV

UMPTN 1992

Pembahasan:
Energi yang dibutuhkan
$\Delta E = E_3 - E_1$
Diketahui bahwa energi dasar = E_1 = –13,6 eV
Maks,

$$E_3 = \frac{E_1}{n^2}$$

$$= \frac{-13{,}6\text{ eV}}{3^2}$$

Jadi,

$$\Delta E = \frac{13{,}6\text{ eV}}{9} - (-13{,}6\text{ eV})$$

$$= 12{,}10\text{ eV}$$

Jawaban: d

Contoh 8.2

Hitunglah kecepatan, energi kinetik, energi potensial, dan energi total elektron pada bilangan kuantum $n = 3$ berdasarkan teori Bohr untuk atom hidrogen.

Jawab:

Diketahui: $n = 3$; $m_e = 9{,}1 \times 10^{-31}$ kg;
$h = 6{,}63 \times 10^{-39}$ Js; $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C;
$a_0 = r_0 = 0{,}53 \times 10^{-10}$ m; $k = 9 \times 10^9$ Nm^2/C^2.

a. kecepatan elektron dihitung dengan menentukan jari-jari orbit $n = 3$ terlebih dahulu, yaitu

$r = a_0 n^2 = (0{,}53 \times 10^{-10}\text{ m})(3)^2 = 4{,}77 \times 10^{-10}$ m, maka

$$v = \frac{n\,h}{2\pi mr} = \frac{3\left(6{,}63\times10^{-34}\text{ Js}\right)}{2(3{,}14)\left(9{,}1\times10^{-31}\text{ kg}\right)\left(4{,}77\times10^{-10}\text{ m}\right)}$$

$v = 7{,}29 \times 10^5$ m/s.

b. Energi kinetik elektron E_k dihasilkan melalui persamaan

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\left(9{,}1\times10^{-31}\text{ kg}\right)\left(7{,}29\times10^5\text{ m/s}\right)$$

$E_k = 2{,}42 \times 10^{-19}$ J

c. Energi potensial elektron E_p dihasilkan melalui persamaan

$$E_p = -k\frac{e^2}{r} = -\frac{9\times10^9\text{ Nm}^2/\text{C}^2\left(1{,}6\times10^{-19}\text{ C}\right)^2}{4{,}77\times10^{-19}\text{ m}} = -4{,}83\times10^{-19}\text{ J}$$

d. Energi total elektron E_T dihasilkan melalui persamaan

$E_T = E_k + E_p$
$= 2{,}42 \times 10^{-19}\text{ J} - 4{,}83 \times 10^{-19}\text{ J}$
$= -2{,}41 \times 10^{-19}$ J

Contoh 8.3

Jika jari-jari elektron yang bergerak pada lintasan stasioner $r = 4{,}5$ Å, berapakah kelajuan elektron tersebut?

Diketahui: massa dan muatannya, $m = 9{,}1 \times 10^{-31}$ kg dan $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C;

Jawab:

Kelajuan elektron (v) dihasilkan dengan menggunakan persamaan:

$$E_k = k\frac{e^2}{2r} \rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = k\frac{e^2}{2r}$$

$$v = \sqrt{k\frac{e^2}{mr}} = \sqrt{\frac{\left(9\times10^9\text{ Nm}^2/\text{C}^2\right)\left(1{,}6\times10^{-19}\text{ C}\right)}{\left(9{,}1\times10^{-31}\text{ kg}\right)\left(4{,}5\times10^{-10}\text{ m}\right)}} = 2{,}75\times10^5\text{ m/s}.$$

Jadi, kelajuan elektron tersebut adalah $2{,}75 \times 10^5$ m/s.

Contoh 8.4

Sebuah elektron pada atom hidrogen berpindah dari energi eksitasi $n = 5$ ke $n = 3$. Berapakah frekuensi pancaran fotonnya?

Jawab:

Diketahui: $E_1 = \frac{-13{,}6}{n^2}$ eV; $n_A = 5$;
$1\text{ eV} = 1{,}6 \times 10^{-19}$ J; $n_B = 3$;
$h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ Js.

Kata Kunci

- model atom Demokritus
- model atom Dalton
- Hukum Perbandingan Tetap
- Hukum Lavoisier
- model atom Thomson
- tetes minyak Millikan
- model atom Rutherford
- model atom Bohr
- jari-jari Bohr
- orbit stasioner
- energi elektron terkuantisasi



Tantangan untuk Anda

Jika sebuah atom terdiri atas beberapa atom, apakah ada gaya elektrostatik antarelektron tersebut? Kemudian, bagaimana lintasan orbit elektron tersebut?

Frekuensi pancaran foton dihasilkan dengan menghitung E_A dan E_B terlebih dahulu.

$$E_A = \frac{-13,6}{n_A^2}\ \text{eV} = \frac{-13,6}{25}\ \text{eV} = -0,544\ \text{eV} = -0,87\times10^{-10}\ \text{J}$$

$$E_B = \frac{-13,6}{n_B^2}\ \text{eV} = \frac{-13,6}{9}\ \text{eV} = -1,511\ \text{eV} = -2,42\times10^{-19}\ \text{J}$$

$$h\ f = E_A - E_B$$

$$f = \frac{E_A - E_B}{h} = \frac{\left(-0,87\times10^{-19}\ \text{J}\right) - \left(-2,42\times10^{-19}\ \text{J}\right)}{6,63\times10^{-34}\ \text{Js}}$$

$$f = 2,34\times10^{14}\ \text{Hz}.$$

Tes Kompetensi Subbab A

Kerjakanlah pada buku latihan.

1. Mengapa **J.J. Thomson** bisa menyimpulkan bahwa elektron merupakan bagian dari atom?
2. Jelaskan kelemahan-kelemahan dalam teori atom Rutherford.
3. Hitung panjang gelombang foton terpendek dan terpanjang dari deret Balmer atom hidrogen.
4. Hitung panjang gelombang foton yang dipancarkan akibat transisi dari $n = 6$ ke $n = 3$. (transisi ke-3 merupakan deret Paschen).
5. Dari bilangan kuantum ke berapakah transisi yang menghasilkan panjang gelombang 1.026 Å dari deret Lyman?
6. Dari bilangan kuantum keberapakah transisi yang menghasilkan panjang gelombang 4.861 Å dari deret Balmer?
7. Hitung kecepatan, energi kinetik, energi potensial, dan energi total elektron pada orbit ke-4 Bohr untuk atom hidrogen.
8. Tentukanlah panjang gelombang foton yang diserap atom hidrogen jika elektron bereksitasi dari $n = 1$ ke tingkat $n = 2$.
9. Elektron atom hidrogen dapat bereksitasi ke tingkat energi yang lebih tinggi akibat penembakan. Tentukan frekuensi foton cahaya yang diserap oleh atom hidrogen agar elektron bereksitasi dari $n = 1$ ke tingkat $n = 2$.
10. Atom hidrogen ditembak dengan elektron yang memiliki energi 12, 6 eV. Tentukan panjang gelombang (λ) radiasi yang dipancarkan gas hidrogen.

B. Atom Berelektron Banyak

1. Kelemahan Teori Atom Bohr

Kerangka dasar teori atom Bohr sebenarnya mengacu kepada model atom Rutherford.

Beberapa kelemahan teori atom Bohr yang dapat disempurnakan sehingga dapat menyingkap misteri tentang atom adalah sebagai berikut.

1. Teori atom Bohr tidak dapat menjelaskan secara rinci tentang garis spektrum. Terutama perbedaan panjang gelombang dan intensitas garis spektrum tersebut.
2. Jumlah elektron yang terlibat dalam atom hanya satu elektron sehingga untuk atom berelektron banyak tidak dapat digunakan lagi. Contohnya, atom hidrogen memiliki satu elektron dan gaya elektrostatis yang ada hanya gaya tarik-menarik antara inti atom dan elektron. Adapun untuk atom yang memiliki lebih dari satu elektron, selain gaya tarik-menarik masih ada gaya tolak antara elektron yang satu dan elektron yang lain. **Bohr** mengabaikan gaya tolak ini.
3. Atom-atom bergabung membentuk zat atau materi. Interaksi antar-atom menyebabkan sifat-sifat yang berbeda antara unsur yang satu dan unsur yang lain. Penyebab perbedaan sifat-sifat tersebut ternyata tidak mampu diterangkan oleh teori atom Bohr.

4. Model atom Bohr melanggar prinsip ketidakpastian yang dikemukakan oleh **Heisenberg**.

Dalam mengatasi kekurangan tersebut, beberapa fisikawan, seperti **Louis de Broglie**, **Wolfgang Pauli**, **Erwin Schrodinger**, dan **Warner Heisenberg** memperkenalkan mekanika gelombang atau mekanika kuantum untuk menggambarkan keadaan energi elektron dalam atom.

2. Bilangan Kuantum

Elektron-elektron bergerak mengelilingi inti dan dikelompokkan ke dalam kulit-kulit. Menurut teori atom Bohr, untuk menyatakan posisi elektron hanya diperlukan satu *bilangan kuantum*, yaitu bilangan kuantum utama. Berbeda dengan teori atom mekanika kuantum, pada teori ini elektron dalam suatu atom digambarkan dalam empat bilangan kuantum, yaitu

1. bilangan kuantum utama (simbol n);
2. bilangan kuantum orbital (simbol ℓ);
3. bilangan kuantum magnetik (simbol m_ℓ);
4. bilangan kuantum spin (simbol m_s).

a. Bilangan Kuantum Utama (*n*)

Bilangan kuantum utama (n) menyatakan besar energi total dalam kulit atom. Hal ini berarti untuk mengeluarkan elektron dari orbitnya diperlukan sejumlah energi. Energi terendah dimulai dari kulit K kemudian kulit L, M, N, O, dan seterusnya. Atom hidrogen memiliki energi total sesuai dengan persamaan

$$E_n = \frac{-13{,}6}{n^2}\ \text{eV} \qquad (8\text{–}24)$$

Untuk ion He^+ yang hanya memiliki sebuah elektron dengan $z = 2$, besar energi total elektronnya adalah

$$E_n = \frac{-13{,}6z^2}{n^2}\ \text{eV} = \frac{-54{,}4}{n^2}\ \text{eV} \qquad (8\text{–}25)$$

Energi total elektron dalam atom adalah konstan dan *terkuantisasi* oleh bilangan kuantum n. Bilangan kuantum utama memiliki nilai 1, 2, 3, ..., sedangkan nama kulit sesuai dengan besar nilai n, yaitu:
untuk $n = 1$, nama kulit K;
untuk $n = 2$, nama kulit L;
untuk $n = 3$, nama kulit M;
untuk $n = 4$, nama kulit N, dan seterusnya

Banyaknya elektron maksimal yang dapat mengisi setiap kulit dapat dituliskan dengan rumus

$$2n^2 \text{ dengan } n = 1, 2, 3, \ldots \qquad (8\text{–}26)$$

Misalnya untuk kulit L, bilangan kuantum utamanya $n = 2$. Jadi, banyaknya elektron maksimal yang dapat mengisi kulit L adalah (2) $(2)^2 = 8$ elektron.



Informasi untuk Anda

Atom adalah partikel yang sangat kecil sehingga tidak dapat diamati dengan cahaya tampak. Menggambarkan struktur atom merupakan pekerjaan yang sangat menarik. Untuk mempelajari atom, para ahli mempelajarinya dari cahaya yang diesensikan oleh atom-atom dari unsur murni. Spektrum cahaya tersebut mengandung informasi tentang struktur, atom, energi ionisasi, dan lain-lain.

Information for You

Atom are tiny, and not observable using visible light. Trying to figure out the structure of atoms is a facinating task. A major source of information about atoms comes from a study of the light emitted by the atoms of a pure material. The spectrum of the light give information about atom structure, ionization energy, etc.

Contoh 8.5

Atom *P* memiliki 15 elektron. Tentukan ada berapa kulit dan berapa elektron pada setiap kulit.

Jawab:

Berdasarkan konfigurasi elektron (rumus $2n^2$) didapatkan kulit K memiliki 2 elektron, kulit L memiliki 8 elektron dan 5 elektron menempati kulit M sehingga ${}_{15}P = 2, 8, 5$. Jadi, pada atom P terdapat 3 kulit (K – L – M).

b. Bilangan Kuantum Orbital (ℓ)

Anda telah mengetahui bahwa elektron berotasi mengitari inti atom pada orbitnya. Bilangan kuantum orbital menyatakan momentum sudut elektron yang berotasi terhadap poros inti atom. Melalui persamaan *Schrodinger*, besar momentum sudut elektron adalah

$$L = \sqrt{\ell(\ell+1)}\hbar \qquad (8\text{–}27)$$

dengan $\hbar = \frac{h}{2\pi}; \hbar = 1{,}054 \times 10^{-34}$ Js

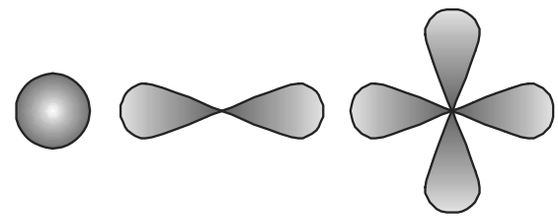
Nilai ℓ bergantung pada nilai bilangan kuantum utama n, yaitu mulai dari nol sampai dengan $(n - 1)$, atau dinyatakan sebagai

$$\ell = 0, 1, 2, 3, 4, ..., (n - 1)$$

Setiap orbital memiliki nama dan bentuk tertentu. Nama orbital yang dinyatakan oleh nilai ℓ adalah

$\ell = 0$, dinamakan subkulit *s* (*sharp*)
$\ell = 1$, dinamakan subkulit *p* (*principal*)
$\ell = 2$, dinamakan subkulit *d* (*diffuse*)
$\ell = 3$, dinamakan subkulit *f* (*fundamental*)

Gambar 8.12 memperlihatkan bentuk setiap orbital. Bilangan kuantum orbital juga sering disebut dengan bilangan kuantum azimut.



Gambar 8.12
Bentuk-bentuk orbital (a) Orbital s merupakan sebuah bola; (b) Orbital p memiliki bentuk seperti balon yang terpilin dua; (c) Orbital d memiliki bentuk seperti empat buah balon yang terpilin.

Contoh 8.6

Tentukan momentum sudut elektron untuk $\ell = 3$ ($h = 6{,}6 \times 10^{-34}$ Js)

Jawab:

Dengan menggunakan **Persamaan (8–26)**, maka

$$L = \sqrt{\ell(\ell+1)}\frac{h}{2\pi} \Rightarrow \sqrt{3(3+1)}\frac{(6{,}6\times10^{-34}\,\text{Js})}{2\pi}$$

$$L = 3{,}7 \times 10^{-34}\,\text{Js}$$

Keadaan momentum sudut orbit elektron dinamakan dengan subkulit, yaitu subkulit *s* untuk keadaan $\ell = 0$, subkulit *p* untuk keadaan $\ell = 1$, subkulit *d* untuk keadaan $\ell = 2$, dan seterusnya. Perhatikan **Tabel 8.2**.

Besarnya momentum sudut orbital elektron untuk deret pertama yang berasal dari spektrum, yaitu deret *s* (*sharp*), *p* (*principle*), *d* (*diffuse*), dan *f* (*fundamental*) adalah

Subkulit *s*, $\ell = 0$, besar momentum sudutnya

$$L = \sqrt{\ell(\ell+1)}\,\frac{h}{2\pi} = 0$$

Subkulit *p*, $\ell = 1$, besar momentum sudutnya

$$L = \sqrt{1(1+1)}\,\frac{h}{2\pi} = \frac{\sqrt{2}h}{2\pi}$$

Subkulit *d*, $\ell = 2$, besar momentum sudutnya

$$L = \sqrt{2(2+1)}\,\frac{h}{2\pi} = \frac{\sqrt{6}h}{2\pi}$$

Subkulit *f*, $\ell = 3$, besar momentum sudutnya

$$L = \sqrt{3(3+1)}\,\frac{h}{2\pi} = \frac{\sqrt{12}h}{2\pi}$$

Gabungan bilangan kuantum utama (*n*) dengan bilangan kuantum orbital (ℓ) biasanya digunakan untuk menyatakan keadaan elektron dalam suatu atom. Misalnya, 2*s* menyatakan keadaan elektron dengan $n = 2$, $\ell = 0$, sedangkan 3*d* menyatakan keadaan elektron dengan $n = 3$ dan $\ell = 2$; demikian seterusnya.

Banyaknya elektron maksimum dalam subkulit *s* adalah 2 elektron, dalam subkulit *p* adalah 6 elektron, subkulit *d* adalah 10 elektron, subkulit *f* adalah 14 elektron dan seterusnya seperti **Tabel 8.3**.

Tabel 8.2
Momentum Sudut Orbital Elektron

ℓ	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, ...
Nama subkulit	*s*, *p*, *d*, *f*, *g*, *h*, *i*, ...

Tabel 8.3 Banyak Elektron pada Setiap Subkulit

Subkulit	*s*	*p*	*d*	*f*	
ℓ	0	1	2	3	
Banyak m_e $(2\ell + 1)$	1	3	5	7	
Banyak elektron $= 2 \times$ banyak m ℓ	2	6	10	14	

c. Bilangan Kuantum Magnetik (m_ℓ)

Oleh karena elektron bermuatan listrik, gerak elektron dapat dipengaruhi oleh medan magnetik. Akibatnya, elektron yang bergerak di dalam orbitnya memiliki momen magnetik. Momen magnetik dari elektron ini dinyatakan dengan bilangan kuantum magnetik (m_ℓ).

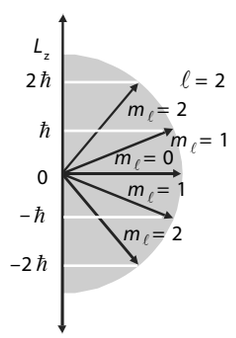
Bilangan kuantum magnetik menyatakan arah momentum sudut elektron. Jika ditetapkan arah medan magnetik luar sejajar dengan sumbu *z*, kemungkinan ℓ dalam arah *z* dinyatakan dengan persamaan

$$L_z = m_\ell \frac{h}{2\pi} \qquad (8\text{–}28)$$

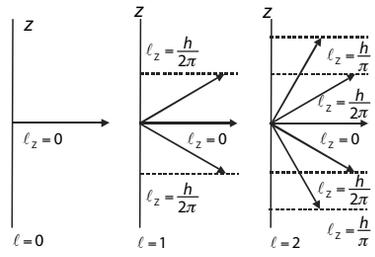
Bilangan kuantum magnetik (m_ℓ) memiliki nilai antara $-\ell$ dan $+\ell$. Misalnya,

untuk $\ell = 0$, harga $m_\ell = 0$ atau terdapat 1 orbital
untuk $\ell = 1$, harga $m_\ell = -1, 0,$ dan $+1$ atau terdapat 3 orbital
untuk $\ell = 2$, harga $m_\ell = -2, -1, 0, +1, +2$ atau terdapat 5 orbital

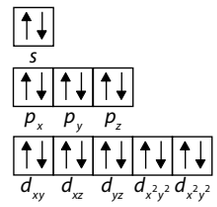
Besar L_z dapat dilihat pada **Gambar 8.13**.



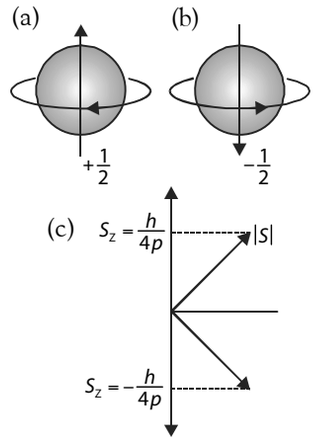
Gambar 8.13
Arah dan besar momentum sudut L_z untuk $\ell = 2$



Gambar 8.14
Arah momentum sudut-sudut orbital *s*, *p*, dan *d*
(a) orbital hanya memiliki 1 kemungkinan arah;
(b) orbital *p* memiliki 3 kemungkinan; dan
(c) orbital *d* memiliki 5 kemungkinan.



Gambar 8.15
Elektron dalam subkulit *s*, *p*, dan *d*.



Gambar 8.16
Arah perputaran dan vektor momentum sudut *S*.

Pada **Gambar 8.13** diperlihatkan vektor-vektor momentum sudut dengan bilangan kuantum orbital tertentu. Bilangan kuantum magnetik juga menggambarkan kecenderungan kedudukan orbital di dalam ruang, seperti terlihat pada **Gambar 8.14.**

d. Bilangan Kuantum Spin (m_s)

Bilangan kuantum spin (m_s) menyatakan arah perputaran elektron terhadap sumbunya (spin) yang dapat menimbulkan momen magnetik. Nilai bilangan kuantum spin ada dua, yaitu $m_s = +\frac{1}{2}$ untuk arah putaran elektron ke kanan dan $m_s = -\frac{1}{2}$ untuk arah putaran elektron ke kiri. Masing-masing ditulis dengan notasi arah panah ke atas dan ke bawah. Subkulit *s* memiliki sebuah orbital dan paling banyak diisi dua elektron. Subkulit *p* memiliki tiga orbital (p_x, p_y, p_z) dan paling banyak diisi oleh $2 \times 3 = 6$ elektron. Elektron dalam subkulit *s*, *p*, dan *d* dapat digambarkan dengan diagram orbital seperti **Gambar 8.15.**

Benda yang berputar memiliki momentum sudut. Vektor momentum sudut yang berkaitan dengan bilangan kuantum *s* ini adalah *S* yang panjangnya:

$$S = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}+1\right)}\frac{h}{2\pi} = \sqrt{\frac{3}{4}}\frac{h}{2\pi} \qquad (8\text{–}29)$$

Arah momentum sudut ditentukan oleh komponen vektor pada sumbu-*z*, yaitu sumbu tegak pada sistem koordinat tiga dimensi.

$$S_2 = M_s \frac{h}{2\pi} \text{ ; dengan } m_s = \frac{1}{2} \text{ atau } -\frac{1}{2} \qquad (8\text{–}30)$$

Gambar spin dan vektor momentum sudut *s* tampak pada **Gambar 8.16**.

Tabel 8.4
Kesimpulan Keempat Bilangan Kuantum

Nama	Notasi	Nilai yang Diperkenankan
Bilangan kuantum utama	n	1, 2, 3, ...
Bilangan kuantum orbital	ℓ	0, 1, 2, ... (n–1)
Bilangan kuantum magnetik	m_ℓ	$-\ell$, ..., –2, –1, 0, +1, + 2, ..., ℓ
Bilangan kuantum spin	m_s	$-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$

Contoh 8.7

Tunjukkanlah bahwa kulit *L* maksimum ditempati oleh 8 elektron.

Jawab:

Kulit *L* memiliki bilangan kuantum $n = 2$.

Untuk $n = 2$, nilai bilangan kuantum orbitalnya $\ell = 0$ dan $\ell = 1$

Untuk $\ell = 0$, terdapat $(2\ell + 1) = (2 \times 0 + 1) = 1$ buah nilai m_ℓ

Untuk $\ell = 1$, terdapat $(2\ell + 1) = (2 \times 1 + 1) = 3$ buah nilai m_ℓ

Jumlah = 4 buah nilai m_ℓ

Untuk 1 buah m_ℓ ditempati oleh 2 buah elektron. Jadi, untuk 4 buah m_ℓ ditempati oleh $4 \times 2 = 8$ buah elektron.

Catatan:

– untuk $n = 3$, bilangan kuantum orbitalnya $\ell = 0, 1,$ dan 2

– untuk $n = 4$, bilangan kuantum orbitalnya $\ell = 0, 1, 2,$ dan 3, ... dan seterusnya.

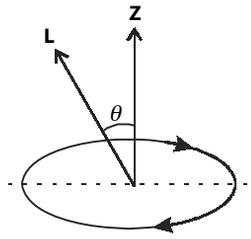


Tantangan untuk Anda

Tentukan besar momentum sudut untuk subkulit:

a. f;
b. g;
c h.

Telah Anda ketahui bahwa bilangan kuantum magnetik erat hubungannya dengan medan magnetik yang ditimbulkan oleh gerak elektron, bagaimana jika atom hidrogen ditempatkan dalam medan magnet homogen B. Perhatikan gerak elektron dalam medan magnet pada **Gambar 8.17.** Jika sebuah elektron bermassa m bergerak dalam orbit yang berjari-jari r dengan frekuensi f, momentum sudut yang dimiliki elektron adalah $L = m_e v r = m_e \omega r^2$, sedangkan arah momentumnya bersudut θ terhadap sumbu-z. Besarnya arus yang timbul akibat gerakan elektron didefinisikan sebagai banyaknya muatan yang mengalir tiap detik. Jadi, arus yang ditimbulkan gerakan elektron $I = \frac{q}{T} = qf = -ef$.



Gambar 8.17
Gerak elektron dalam medan magnet B.

Anda juga memahami bahwa gerakan elektron juga menimbulkan medan magnet (ingat medan magnet di sekitar arus listrik). Ketika di tempat elektron banyak diberikan medan magnet, yaitu medan magnet dari luar, maka akan terjadi interaksi antara dua magnet di tempat ini. Implikasinya adalah dapat memberikan torsi τ yang menyebabkan gerakan elektron berubah. Besarnya torsi akibat medan magnet B adalah

$$\tau = \mu \times \mathbf{B} \qquad (8\text{–}31)$$

dengan

$$\mu = \text{IA} \qquad (8\text{–}32)$$

Keterangan:

μ = momen magnetik

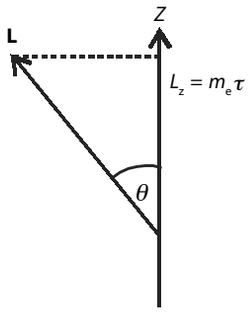
A = luas dari bidang elektron

Oleh karena $I = -ef$ dan $A = \pi r^2$, Anda dapat menuliskan

$$\mu = e f \pi r^2 = -e \left(\frac{L}{2\pi m_e r^2} \right) \pi r^2 = \left(\frac{-eL}{2m_e} \right) \qquad (8\text{–}33)$$

Tanda negatif menunjukkan arah m berlawanan dengan arah momentum sudut L. Jadi, besarnya torsi yang disebabkan oleh medan magnet B adalah

$$\tau = \left(\frac{-eL}{2m_e} \right) LB \sin \theta \qquad (8\text{–}34)$$



Gambar 8.18
Arah momentum sudut elektron.

Torsi inilah yang memutar orbit elektron sehingga berubah arah. Perhatikan **Gambar 8.18** yang melukiskan orbit-orbit elektron dan perhatikan perubahan arah putarannya untuk mengetahui berapa kemungkinan perubahan gerakan elektron dapat kita lihat melalui energi magnetik dari pengaruh gerakan elektron dari medan magnet luar B.

Besar energi magnet memenuhi persamaan:

$$E = \mu B = \mu B \cos\theta \left(\frac{-e}{2m_e} \right) LB \cos\theta$$

Besaran $\frac{-e}{2m_e}$ dinamakan pembanding giromagnetik (*gyromagnetic ratio*).

Perhatikan **Gambar 8.18**. Gambar tersebut menunjukkan bahwa $\cos\theta = \frac{m_e\tau}{L}$ sehingga kita peroleh

$$E = \frac{-e}{2.m_e} LB\cos\theta \left(\frac{-e}{2m_e}\right) LB \left(\frac{m_e\tau}{L}\right)$$

$$\boxed{E = \left(\frac{-e\tau}{2m_e}\right) m_e B} \qquad (8\text{–}35)$$

Oleh karena m_e memiliki beberapa nilai dan bersifat diskrit, energi interaksi medan magnetik ini juga memiliki beberapa nilai.

$$_____ \quad E_0 + \frac{\tau B}{2m_e}$$

$$_____ \quad _____ \quad E_0$$

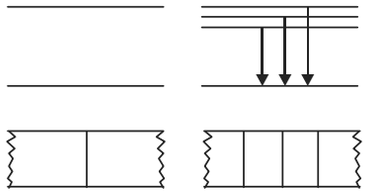
$$_____ \quad E_0 - \frac{\tau B}{2m_e}$$

Sebagai contoh, jika bilangan kuantum $\ell = 1$, energi elektron akan mengalami perubahan sebagai berikut:

Ketika $m_e = 1$ energi elektron menjadi $E_{tot} = E_{\text{elektron awal}} - \ell\left(\frac{-e\tau}{2m_e}\right)$

Ketika $m_e = 0$ energi elektron tetap tidak berubah

Ketika $m_e = -1$ energi elektron menjadi $E_{tot} = E_{\text{elektron awal}} + \ell\left(\frac{-e\tau}{2m_e}\right)$



Gambar 8.19
Terpecahnya garis spektrum akibat medan magnet.

Jadi, tingkat energi elektron pecah menjadi 3 bagian. Untuk $\ell = 2$ energi elektron akan pecah menjadi 5 bagian (sesuai dengan nilai m), inilah pentingnya bilangan kuantum magnetik dalam menentukan gerak orbit elektron.

Pecahnya tingkat-tingkat energi ini telah diamati oleh **Zeeman** melalui eksperimennya. Ia mengamati spektrum atom hidrogen ketika diberi medan magnetik kuat, ternyata garis-garis spektrum yang diamati pecah menjadi beberapa bagian.

Pecahnya garis spektrum ini ternyata akibat transisi dari tingkat energi yang terpecah itu dapat Anda pahami pada **Gambar 8.19**. Perubahan kecil energi memenuhi persamaan $\Delta E = \mu_B B$ sehingga dapat memengaruhi panjang gelombang, melalui metode diferensiasi $E = \frac{hc}{\lambda}$, akan diperoleh:

$$dE = \frac{hc}{\lambda^2} d\lambda$$

Atau dengan mengambil nilai mutlaknya, diperoleh

$$\boxed{\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{hc}\Delta E} \qquad (8\text{–}36)$$

Contoh 8.8

Hitunglah perubahan panjang gelombang foton yang terjadi akibat transisi dari 2*p* ke 1*s* apabila atom hidrogen ditempatkan dalam medan magnet sebesar 2,0 T.

Jawab:

$$E = E_2 - E_1 = \frac{-13,6eV}{n_2^2} - \left(\frac{-13,6eV}{n_1^2}\right) = \frac{-13,6eV}{2^2} - \frac{(-13,6eV)}{1^2} = 10,2\ eV.$$

Jadi, panjang gelombang yang dipancarkan adalah

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{\left(6,625 \times 10^{-34}\text{Js}\right)\left(3\times10^{8}\text{m/s}\right)}{\left(10,2\,\text{eV}\right)\left(1,6\times 10^{-19}\text{J/eV}\right)} = 1,22 \times 10^{7}\text{m}.$$

Perubahan energi $\Delta E = \mu_B B = (9,27 \times 10^{-24}\,\text{J/T})\,(2,0\,\text{T}) = 1,854 \times 10^{-23}\,\text{J}$.

Jadi, berdasarkan **Persamaan (8–35)**, diperoleh

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{hc}\,\Delta E = \frac{\left(1,22 \times 10^{-7}\text{m}\right)^2}{\left(6,65\times 10^{-34}\text{Js}\right)\left(3\times 10^{8}\text{m/s}\right)}\,(1,854 \times 10^{-23}\,\text{J}) = 1,39 \times 10^{-12}\text{m}.$$

3. Sifat Atom

Sifat-sifat suatu unsur dapat diamati dengan melihat struktur atomnya. Susunan elektron dalam suatu atom dapat dipakai sebagai dasar untuk mengetahui sifat-sifat atom tertentu. Pada sebagian unsur, kulit-kulit atom ada yang terisi penuh elektron dan ada yang kosong. Kulit yang tidak penuh terisi elektron berada pada kulit paling luar. Elektron pada kulit terluar ini dinamakan *elektron valensi*.

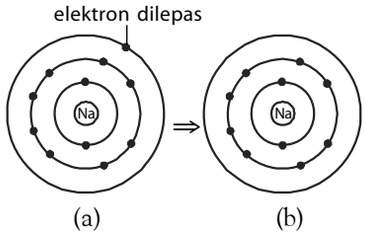
Pengisian elektron dimulai dari tingkat energi terendah. Konfigurasi yang mantap terdapat pada subkulit yang terisi penuh. Jika subkulit telah terisi penuh, sisa elektron akan mengisi subkulit selanjutnya. Misalnya, ada satu elektron yang terisi pada subkulit terluar, maka elektron ini cenderung mudah lepas supaya atom menjadi stabil. Pelepasan elektron ini dapat terjadi dengan cara berikatan dengan atom lain.

Sebagai contoh, atom Na yang memiliki konfigurasi

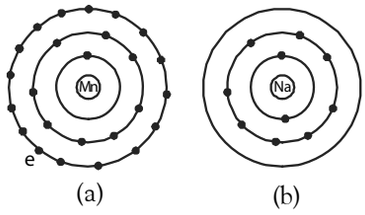
$$_{11}N_a = \frac{1s^2}{K}\,\frac{2s^2\,2p^6}{L}\,\frac{3s^1}{M}$$

Kulit *M* terdiri atas subkulit *s*, *p*, dan *d*. Dari konfigurasi atom Na pada **Gambar 8.20** terlihat hanya ada satu elektron yang mengisi kulit *M*, yaitu pada orbit *s*. Untuk menjadi stabil, atom Na cenderung melepaskan satu elektron terluarnya yang terdapat pada kulit *M*. Sebaliknya, jika pada subkulit terluar kekurangan satu elektron, untuk menjadi stabil, atom ini cenderung mudah menerima satu elektron dari luar.

Perhatikan juga **Gambar 8.21**. Pada atom $_{25}$Mn kulit terluarnya, yaitu kulit *M* terisi 15 elektron. Kulit *M* terisi maksimal 16 elektron, berarti terdapat kekurangan 1 elektron sehingga atom Mn cenderung menerima satu elektron dari atom lain supaya menjadi stabil. Atom Na dan Mn dapat bergabung menjadi molekul yang stabil karena pada setiap atom akan memiliki kulit atau subkulit yang terisi penuh oleh elektron.



Gambar 8.20
(a) Atom Na, kulit terluarnya terisi satu elektron.
(b) Atom Na yang stabil setelah melepas elektron terluarnya.



Gambar 8.21
(a) Atom Mn menerima elektron dari atom Na.
(b) Atom Na yang tidak stabil.

Dari uraian tersebut, dapat diambil kesimpulan bahwa atom-atom cenderung untuk memiliki konfigurasi seperti gas mulia, yaitu memiliki keadaan yang stabil dengan cara melepas atau menerima elektron.

4. Sistem Periodik

Sistem periodik unsur-unsur disusun berdasarkan kenaikan nomor atom atau berdasarkan jumlah elektron. Sistem periodik bertujuan menjelaskan sifat unsur-unsur pada periodik dan golongan tertentu, serta menjelaskan mengapa unsur-unsur dalam satu periode memiliki sifat yang berbeda antara golongan yang satu dan golongan yang lainnya.

Unsur-unsur golongan alkali dan alkali tanah keduanya termasuk golongan *s* karena dalam konfigurasi elektron diakhiri dengan subkulit *s*. Jari-jari atom di sebelah kiri relatif lebih besar dibandingkan dengan unsur-unsur sebelah kanannya. Adanya elektron terluar ini, memberikan sifat konduktor listrik yang baik. Kereaktifannya cukup tinggi untuk bereaksi dengan unsur lain terutama dengan unsur golongan halogen karena yang satu mudah melepaskan elektron dan yang lain memiliki kecenderungan besar untuk menerima elektron.

Unsur-unsur golongan *p* yang tidak terisi penuh oleh elektron dalam konfigurasinya terlihat kekurangan elektron untuk memiliki konfigurasi seperti gas mulia. Jika Anda perhatikan golongan halogen, unsur-unsur ini cenderung mudah menangkap elektron untuk membentuk senyawa. Dikatakan unsur-unsur tersebut memiliki kereaktifan yang tinggi dibandingkan dengan unsur golongan *p* lainnya.

Golongan gas mulia memiliki konfigurasi elektron yang sudah penuh pada kulit terluarnya. Kecenderungan menangkap atau menerima elektron sangat kecil. Hal ini menyebabkan unsur gas mulia tidak membentuk senyawa dengan unsur lain.

Prinsip Pauli, aturan Aufbau, dan kaidah Hund sangat membantu untuk memahami keteraturan susunan elektron atau subkulit dalam daftar berkala. Konfigurasi elektron dalam atom adalah susunan elektron dalam atom sesuai dengan tingkat energinya. Dalam pembahasan ini, akan Anda tinjau konfigurasi elektron per subkulit. Dengan konfigurasi elektron tersebut dapat diketahui bilangan kuantum yang berkaitan dan sifat-sifatnya dapat diketahui dari jumlah elektron terluar. Aturan penulisan konfigurasi elektron berdasarkan hal-hal berikut ini.

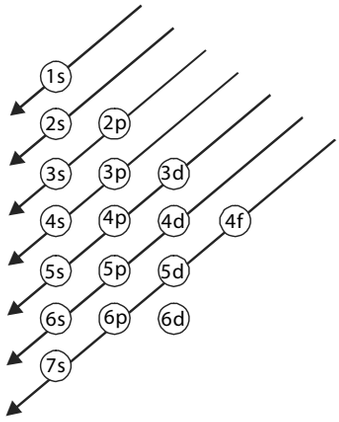
a. Aturan Aufbau

Menurut aturan Aufbau, elektron dalam suatu atom akan mulai mengisi suatu orbital dari tingkat yang energinya paling rendah sampai yang paling tinggi. Tiap tingkatan energi diisi elektron sebanyak mungkin sampai penuh. Tiap kali keadaan (n, ℓ) penuh, keadaan berikutnya mulai diisi, demikian seterusnya. Prinsip pengisian ini dapat digambarkan dalam bentuk diagram pada **Gambar 8.22**.

Perhatikan hubungan bilangan kuantum utama (n) dan bilangan kuantum orbital atau azimut (ℓ) sebagai berikut. Urutan tingkat energi sesuai dengan urutan arah panah, yaitu

$1s\ 2s\ 2p\ 3s\ 3p\ 4s\ 3d\ 4p\ 5s\ 4d\ 5p\ 6s$, dengan

$s \rightarrow 2$ elektron, $p \rightarrow 6$ elektron, $d \rightarrow 10$ elektron, $f \rightarrow 14$ elektron



Gambar 8.22
Pengisian elektron menurut aturan Aufbau.

Tantangan untuk Anda

Jelaskan sifat-sifat yang dimiliki atom berikut ini.

1. $^{40}_{20}Ca$
2. $^{30}_{31}Ga$
3. $^{80}_{35}Br$

Sebagai contoh, perhatikan cara penulisan konfigurasi elektron berikut.

1) Atom C memiliki nomor atom 6, berarti dalam pada setiap atomnya terdapat enam elektron sehingga konfigurasinya $_{6}C = 1s^2\ 2s^2\ 2p^2$.
2) Atom K memiliki nomor atom 19, berarti pada setiap atomnya terdapat 19 elektron sehingga konfigurasi elektronnya $_{19}K = 1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^1$.
3) Atom Co memiliki nomor atom 27, berarti pada setiap atomnya terdapat 27 elektron sehingga konfigurasi elektronnya $_{27}Co = 1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^2\ 3d^7$.

Cara penulisan tersebut cukup panjang sehingga harus dilakukan penyingkatan berdasarkan konfigurasi gas mulia, yaitu

$_{2}He = 1s^2$
$_{10}Ne = 1s^2\ 2s^2\ 2p^6$
$_{18}Ar = 1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6$
$_{36}Kr = 1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^2\ 3d^{10}\ 4p^6$

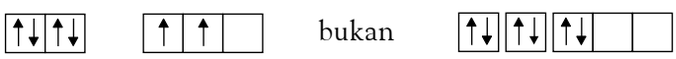
Dengan demikian, konfigurasi elektron pada contoh tersebut disingkat sebagai berikut.

$_{6}C = 1s^2\ 2s^2\ 2p^2$ disingkat: (He) $2s^2\ 2p^2$
$_{19}K = 1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^1$ disingkat: (Ar) $4s^1$
$_{27}Co = 1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^2\ 3d^7$ disingkat: (Ar) $3d^7\ 4s^2$

c. Aturan Hund

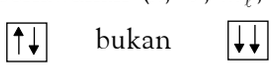
Menurut **Hund**, dalam orbital yang setingkat, elektron-elektron tidak boleh berpasangan sebelum seluruh orbital setingkat terisi oleh sebuah elektron. Penempatan elektron pada orbital *p, d, f* yang memiliki tingkat energi yang sama pada subkulit yang sama, masing-masing diisi dengan satu elektron terlebih dahulu dengan arah spin yang sama, baru kemudian diisi dengan elektron berikutnya dengan arah yang berlawanan.

Hal ini berarti, semua elektron bermuatan sama sehingga elektron akan menempati orbital yang masih kosong sebelum berpasangan. Misalkan, atom C dengan nomor atom 6 dan konfigurasi elektronnya: $1s^2\ 2s^2\ 2p^2$, diagram konfigurasi elektronnya adalah



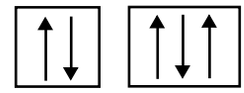
c. Asas Larangan Pauli

Menurut **Wolfgang Pauli**, dalam suatu atom tidak boleh ada elektron yang memiliki keempat bilangan orbital dan magnetik yang sama. Bilangan kuantum spinnya harus berlawanan (n, ℓ, m_ℓ, dan m_s).



Asas ini sangat penting untuk memahami struktur atom, apalagi untuk mengkaji sifat-sifat atom berelektron banyak.

Sekarang, tinjau helium dengan nomor atom 2. Elektron pertama atom helium pada keadaan dasar memiliki himpunan bilangan kuantum ($n = 1, \ell = 0, m_\ell = 0$, dan $m_s = +\frac{1}{2}$). Elektron kedua bisa memiliki ketiga bilangan kuantum n, ℓ, dan m_ℓ sama tetapi bilangan kuantum keempat m_s harus berbeda. Oleh karena elektron pertama $m_s = +\frac{1}{2}$, elektron kedua haruslah $m_s = -\frac{1}{2}$.



Gambar 8.23
Berdasarkan asas larangan Pauli, satu orbital maksimum ditempati dua elektron dengan spin yang berlawanan.

Asas larangan Pauli juga membatasi setiap orbital hanya mampu menampung maksimum 2 elektron dan dalam satu orbital harus memiliki spin dengan arah berlawanan. Apabila dalam orbital ada elektron ketiga, misalnya spin searah dengan spin elektron pertama (**Gambar 8.23**), kumpulan keempat bilangan kuantum elektron ketiga persis sama dengan elektron pertama. Ini jelas melangggar asas larangan Pauli.

5. Spektrum Emisi dan Spektrum Absorpsi

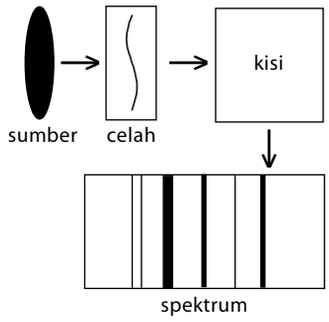
Zat padat maupun zat cair pada suhu tertentu dapat memancarkan radiasi dengan panjang gelombang yang berbeda-beda pada tingkat energi yang berbeda. Dari berbagai segi yang dapat diamati, radiasi ini dapat diterangkan oleh dasar teori kuantum cahaya, dan tidak bergantung pada perincian proses radiasi itu sendiri atau dari sifat materialnya. Tingkat energinya bergantung pada bilangan kuantumnya. Berdasarkan hasil penemuan ini, dapat disimpulkan bahwa yang terjadi adalah kelakuan kolektif sejumlah atom yang saling berinteraksi dari karakteristik atom-atom dari unsur-unsur tertentu.

a. Spektrum Emisi

Pada kondisi tertentu, atom atau molekul pada gas bertekanan rendah berjarak rata-rata cukup jauh sehingga interaksi yang terjadi hanya saat bertumbukan. Dalam keadaan seperti ini, diharapkan bahwa radiasi yang dipancarkan merupakan karakterisitik dari atom atau molekul secara individu yang terdapat di sana. Hal ini terbukti secara eksperimental. Jika gas atomik atau uap atomik yang bertekanan di bawah tekanan atmosfer (dieksitasikan biasanya dengan mengalirkan arus listrik), radiasi yang dipancarkan memiliki spektrum yang berisi panjang gelombang tertentu saja.

Spektrum emisi adalah spektrum yang dihasilkan oleh pancaran gelombang elektromagnetik, misalnya cahaya Matahari yang dihasilkan oleh atom-atom gas suatu unsur. Jika cahaya tabung gas unsur dilewatkan pada sebuah prisma, cahaya akan terurai menjadi beberapa garis warna spektrum yang setiap spektrum memiliki panjang gelombang yang berbeda.

Untuk menguraikan cahaya gas suatu unsur dapat digunakan kisi berupa garis-garis pemisah yang sangat rapat. Peralatan untuk menghasilkan spektrum emisi dapat dilihat pada **Gambar 8.24**.



Gambar 8.24
Proses untuk menghasilkan spektrum emisi

Misalnya, cahaya yang dipancarkan itu dihasilkan oleh atom-atom gas hidrogen. Elektron pada atom gas akan tereksitasi ke tingkat energi yang lebih tinggi, jika mendapat tambahan energi dari luar. Misalnya, dari 1*s* ke 2*s* atau 2*p*. Ketika elektron kembali ke tingkat energi dasar, atom akan memancarkan energi berupa gelombang elektromagnetik. Gelombang elektromagnetik ini melewati celah sempit, kemudian oleh kisi akan diuraikan menjadi beberapa warna. Setelah keluar dari kisi, pada layar akan tampak garis-garis berwarna yang setiap warna sesuai dengan energi tertentu.

Tidak semua warna spektrum akan muncul pada setiap spektrum suatu unsur, tetapi hanya warna-warna tertentu saja yang akan muncul. Untuk setiap unsur akan memancarkan spektrum yang berlainan. Hal inilah yang membedakan unsur yang satu dan unsur yang lain.

Berdasarkan persamaan panjang gelombang yang sudah Anda kenal, frekuensi sebanding dengan *tetapan Rydberg*. Rumusan panjang gelombang dapat dituliskan

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) \qquad (8\text{–}37)$$

Keterangan:

R = tetapan Rydberg = $1{,}097 \times 10^7$ /m

λ = panjang gelombang elektromagnetik (m)

n = bilangan kuantum utama

Spektrum emisi ada tiga macam, yaitu *spektrum garis*, *spektrum pita*, dan *spektrum kontinu*.

1) Spektrum Garis

Spektrum garis dihasilkan oleh gas-gas bertekanan rendah yang dipanaskan. Spektrum ini terdiri atas garis-garis cahaya monokromatik dengan panjang gelombang tertentu. Panjang gelombang cahaya yang terdapat dalam spektrum merupakan karakteristik dari unsur yang menghasilkan spektrum tersebut. Akibat pemanasan, atom gas akan menyerap energi sehingga berada dalam keadaan tereksitasi. Dalam keadaan ini, atom gas tidak stabil dan akan berusaha ke keadaan dasar dengan memancarkan foton berupa gelombang elektromagnetik.

2) Spektrum Pita

Spektrum pita dihasilkan oleh gas dalam keadaan molekuler, misalnya gas H_2, O_2, N_2, dan CO. Spektrum yang dihasilkan berupa kelompok garis-garis yang sangat rapat sehingga membentuk pita-pita.

3) Spektrum Kontinu

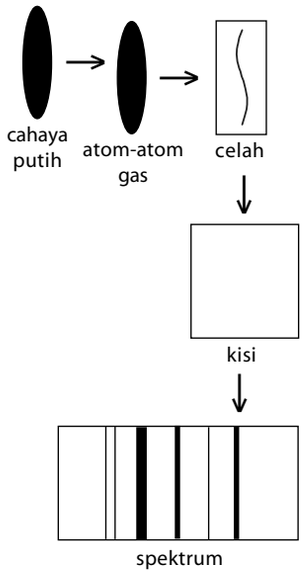
Spektrum kontinu adalah spektrum yang terdiri atas cahaya dengan semua panjang gelombang, walaupun dengan intensitas yang berbeda. Spektrum kontinu dihasilkan oleh zat padat, zat cair, dan gas yang bertekanan tinggi dan berpijar. Berpijarnya bentuk zat-zat tersebut karena memiliki atom yang berjarak relatif lebih kecil satu dan yang lainnya sehingga saling berinteraksi. Akibatnya, tingkat-tingkat energi atom bergeser untuk memenuhi aturan Pauli.

b. Spektrum Absorpsi

Spektrum absorpsi adalah spektrum yang terjadi karena penyerapan panjang gelombang tertentu dari suatu cahaya. Spektrum absorpsi terdiri atas sederetan garis hitam pada spektrum kontinu. Penyerapan terhadap panjang gelombang tertentu terjadi pada foton yang memiliki energi yang tepat sama dan selisih energi antara tingkat eksitasi dan tingkat dasar.

Spektrum absorpsi dihasilkan jika cahaya putih dilewatkan pada tabung yang berisi atom-atom gas suatu unsur yang kemudian atom-atom tersebut akan menyerap (mengabsorpsi) sebagian cahaya putih. Garis-garis yang dihasilkan sesuai dengan garis-garis pada spektrum emisi. Jika kedua spektrum ini didekatkan akan tampak garis-garis gelap dan terang.

Contoh spektrum absorpsi adalah spektrum Matahari. Secara sepintas, spektrum Matahari tampak seperti spektrum kontinu. Akan tetapi, jika dicermati akan tampak garis-garis gelap terang yang disebut *garis-garis fraunhoffer*. Adanya *garis-garis fraunhoffer* disebabkan cahaya putih dari bagian inti Matahari diserap oleh atom-atom dan molekul-molekul gas dalam atmosfer Matahari maupun atmosfer Bumi. Bagian Matahari yang bersuhu sekitar 6.000 ^oC dapat menimbulkan spektrum.



Gambar 8.25
Proses untuk menghasilkan spektrum absorpsi

Gambar 8.25 memperlihatkan bagan dan peralatan spektrum absorpsi. Berdasarkan hasil percobaan dan hasil eksperimen diperoleh kesimpulan bahwa jika zat berpendar (beradiasi/memancarkan spektrum emisi) merupakan zat yang baik untuk mengabsorpsi spektrumnya.

Garis spektrum atom hidrogen terdiri atas beberapa deret, yaitu deret Lymann, deret Balmer, deret Paschen, deret Brackett, dan deret Pfund. Deret-deret tersebut memenuhi persamaan

$$\frac{1}{\lambda} = z^2 R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) \qquad (8\text{–}38)$$

Keterangan

z = nomor atom

6. Energi Ionisasi, Afinitas Elektron, dan Elektron Valensi

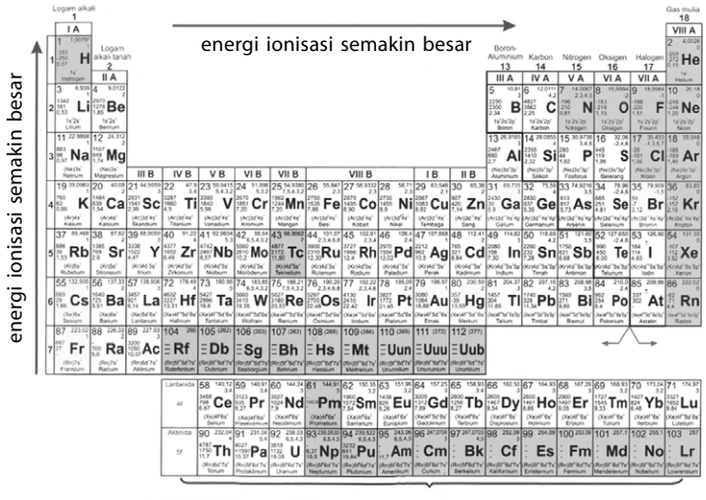
Suatu atom akan berikatan dengan atom lain karena adanya faktor-faktor tertentu. Kemampuan suatu atom untuk berikatan dengan atom lain ditentukan oleh keadaan jumlah elektron terluarnya. Elektron memiliki kecenderungan untuk membentuk susunan yang stabil (susunan gas mulia). Beberapa faktor yang memengaruhi atom untuk melepaskan atau mengikat elektron adalah sebagai berikut.

a. Energi Ionisasi

Jika suatu atom terdapat satu elektron di luar subkulit yang mantap, elektron cenderung mudah melepaskan ikatannya agar memiliki konfigurasi seperti gas mulia. Untuk melepaskan elektron terluarnya ini diperlukan energi yang disebut *energi ionisasi*. Energi ionisasi untuk atom hidrogen sebesar 13,6 eV.

Pengukuran energi ionisasi pada unsur dalam gas memperlihatkan bahwa dalam suatu periode semakin banyak elektron dan proton, maka gaya tarik-menarik elektron terluar dengan inti semakin besar (jari-jari kecil). Akibatnya, elektron sukar dilepas sehingga energi untuk melepas elektron semakin besar, yang berarti energi ionisasi besar.

Jika jumlah elektron sedikit seperti unsur pada golongan IA, jari-jarinya besar, gaya tarik menarik elektron dengan inti lebih kecil. Akibatnya, energi untuk melepas elektron terluar relatif lebih kecil yang berarti energi ionisasinya kecil. Dari atas ke bawah dalam satu golongan, jari-jari atom semakin besar. Hal ini menyebabkan elektron terluar relatif mudah lepas dibandingkan dengan atom yang berada di atasnya. Hal ini berarti, dari atas ke bawah dalam satu golongan, energi ionisasi berkurang. Perubahan energi ionisasi dalam tabel periodik dapat dilihat pada **Gambar 8.26**.



Gambar 8.26
Perulangan sifat pada sistem periodik

Golongan IA dalam susunan berkala unsur-unsur seperti gambar disebut juga golongan alkali yang meliputi Li, Na, K, Rb, Cs, dan Fr. Unsur yang paling sedikit adalah fransium (Fr) sebab bersifat radioaktif sehingga mudah berubah menjadi unsur lain.

Sifat-sifat kimia unsur alkali adalah hanya memiliki satu elektron di kulit terluar. Dapatlah diterka bahwa unsur-unsur ini memiliki energi ionisasi yang rendah (sangat mudah melepaskan elektron). Semakin besar jari-jari atom, energi ionisasinya semakin rendah. Dengan kata lain, unsur-unsur alkali ini sangat reaktif atau mudah sekali membentuk senyawa. Unsur-unsur ini mudah sekali bereaksi dengan oksigen di udara. Itulah sebabnya, logam-logam alkali harus disimpan dalam minyak tanah dan tidak boleh dibiarkan lama di udara terbuka.

b. Afinitas Elektron

Afinitas elektron adalah energi yang dilepaskan jika suatu atom menangkap sebuah elektron. Atom-atom yang memiliki gaya tarik-menarik antar intinya kecil menunjukkan bahwa afinitas elektronnya juga kecil. Hal-hal yang memengaruhi besar kecilnya afinitas elektron adalah jumlah muatan dalam inti, jarak antar inti, dan jumlah elektron dalam atom.

Dalam satu golongan, dari atas ke bawah harga afinitas elektron semakin kecil. Dalam satu periode dari kiri ke kanan harga afinitas elektron semakin besar. Atom-atom yang semakin mudah menangkap elektron akan memiliki harga afinitas elektron yang semakin besar. Untuk menggambarkan tingkat kemudahan suatu atom menangkap elektron digunakan besaran elektronegativitas atau keelektronegatifan. Suatu unsur yang memiliki energi ionisasi tinggi memiliki elektronegativitas tinggi. Artinya, memiliki kecenderungan besar untuk menangkap elektron.

Unsur yang mudah melepaskan elektron dan membentuk ion positif dinamakan unsur yang elektropositif. Sebaliknya, unsur yang mudah menangkap elektron dan membentuk ion negatif dinamakan unsur elektronegatif. Pada umumnya, unsur-unsur yang memiliki elektron valensi kurang dari empat bersifat elektropositif. Adapun unsur-unsur yang memiliki elektron valensi lebih dari empat bersifat elektronegatif. Afinitas beberapa unsur terlihat pada **Tabel 8.5**.

Tabel 8.5
Afinitas Beberapa Unsur

Unsur	Afinitas Elektron (kJ/mol)
H	–78
Li	–58
Na	–78
B	–35
C	–126
Si	–186
N	–9
P	–76
O	–148
F	–354
Cl	–370
Br	–348
I	–320

Sumber: *General Chemistry*, 1990

c. Elektron Valensi

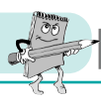
Elektron yang paling berperan dalam menentukan sifat Fisika dan Kimia adalah elekron yang berada pada kulit paling luar. Elektron ini biasa disebut *elektron valensi*. Akan tetapi, untuk kulit yang penuh, elektronnya tidak turut serta dalam menentukan sifat-sifat tersebut.

Dari susunan berkala unsur-unsur dengan sistem periodik, dalam satu golongan atom-atom tersebut memiliki elektron valensi yang sama. Misalnya, atom Li yang memiliki 3 elektron salah satunya adalah elektron valensi. Demikian halnya, atom K memiliki 19 elektron salah satunya adalah elektron valensi. Kesimpulannya atom Li dan atom K yang berada dalam satu golongan, memiliki satu elektron valensi.

Kata Kunci

- teori atom Bohr
- bilangan kuantum utama
- bilangan kuantum orbital
- bilangan kuantum magnetik
- bilangan kuantum spin
- prinsip Pauli
- aturan Aufbau
- kaidah Hund
- spektrum emisi
- spektrum absorsi
- garis-garis Praunhoffer
- energi ionisasi
- afinitas elektron
- elektron valensi

Mari Mencari Tahu



Dari penelitian tentang partikel subatomik, para fisikawan menemukan bahwa partikel penyusun atom itu bukan hanya elektron dan neutron. Buatlah tulisan tentang partikel-partikel subatomik yang baru ditemukan itu. Anda dapat mencari informasinya dari internet. sebagai contoh, Anda bisa mengetikkan "quark" pada *Search Engine* yang Anda gunakan. Anda kumpulkan tugas ini pada guru dan diskusikan tugas ini bersama guru Fisika dan **diskusikan** bersama teman-teman dan guru.

Tes Kompetensi Subbab B

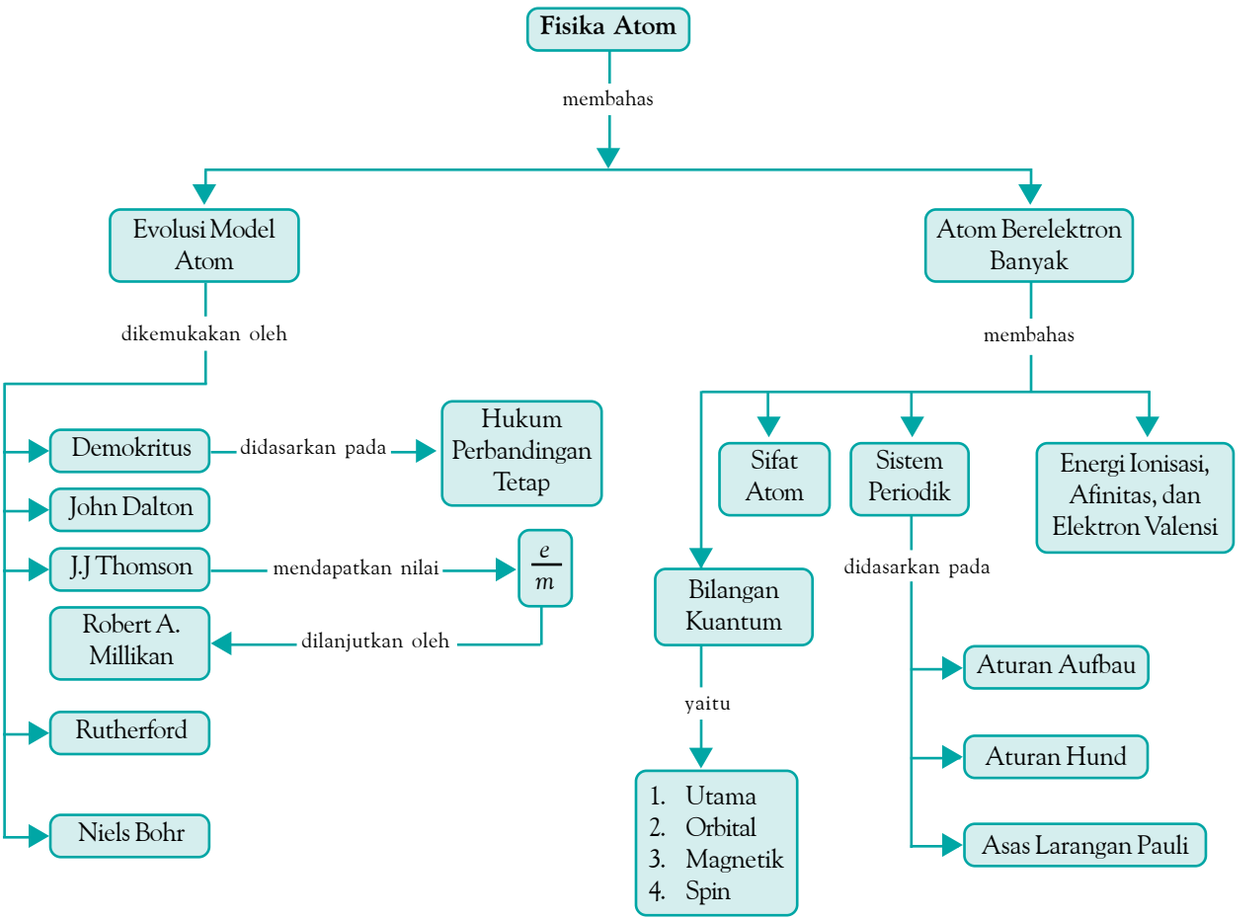
Kerjakanlah pada buku latihan.

1. Tunjukkanlah bahwa kulit:
 a. M maksimum ditempati oleh 18 buah elektron
 b. N maksimum ditempati oleh 32 buah elektron
2. Tentukanlah energi total dari sebuah elektron pada ion $Li+2$ untuk bilangan kuantum utama $n = 2$.
3. Jelaskan apa yang Anda ketahui tentang
 a. bilangan kuantum utama;
 b. bilangan kuantum orbital;
 c. bilangan kuantum spin.
4. Mengapa pada atom berelektron banyak terjadi pemisahan tingkat energi dari subkulit dengan kulit yang sama?
5. Mengapa satu orbital hanya dapat ditempati oleh dua elektron?
6. Bagaimana kesesuaian asas larangan Pauli dan sistem periodik?
7. Apakah penyebab terjadinya spektrum absorpsi dan spektrum garis?
8. Jelaskan dengan spektroskopi bagaimana unsur helium ditemukan pada Matahari?
9. Terangkan energi ionisasi dalam satu golongan dan satu periode.
10. Bagaimana afinitas elektron Na dibandingkan dengan Cl dan K?

Rangkuman

1. Perkembangan model atom melalui beberapa tahap sebagai berikut.
 – model atom Demokritus
 – model atom Dalton
 – model atom Thomson
 – model atom Rutherford
 – model atom Bohr
2. Dalam membuat teori atom, Dalton mengambil acuan (dasar) dari:
 – eksperimen Proust tentang Hukum Perbandingan Tetap yang menyatakan bahwa "senyawa disusun oleh unsur-unsur dengan perbandingan tetap";
 – eksperimen Antonie Lavoisier dan Preistely tentang Hukum Lavoisier yang menyatakan bahwa "massa zat sebelum dan sesudah reaksi adalah sama".
3. Joseph John Thomson melakukan eksperimen dengan menggunakan tabung sinar katode yang sedikit dimodifikasi. Hasil eksperimen yang diperolehnya adalah bahwa perbandingan muatan dan massa $\left(\frac{e}{m}\right)$ sebagai berikut.
$$\left(\frac{e}{m}\right) = 1{,}758803 \times 10^{11}\ \text{C/kg}$$
4. Robert A. Millikan melakukan eksperimen tetes minyak. Hasil eksperimen menemukan harga muatan elektron $e = 1{,}6021292 \times 10^{-19}$ C. Dengan menggabungkan penemuan Thomson dan Millikan, diperoleh harga massa elektron adalah $m_e = 9{,}11 \times 10^{-31}$ kg.
5. Energi elektron berdasarkan teori Bohr.
$$E_n = -\frac{m_e^{\,4}}{32\pi^2\varepsilon_0^{\,2}\hbar^2}\frac{1}{n^2} \text{ atau } E_n = -\frac{13{,}6}{n^2}\text{eV}$$
6. Frekuensi gelombang elektromagnetik yang diserap atau dipancarkan dari dua keadaan stasioner adalah
$$hf = \left|E_i - E_f\right|$$
7. Elektron dalam suatu atom digambarkan dalam empat bilangan kuantum, yaitu
 – bilangan kuantum utama (n);
 – bilangan kuantum orbital (ℓ);
 – bilangan kuantum magnetik (m_ℓ);
 – bilangan kuantum spin (m_s).
8. Aturan penulisan konfigurasi elektron didasarkan pada:
 – aturan Aufbau, menyatakan bahwa elektron dalam suatu atom akan mulai mengisi suatu orbital dari tingkat yang energinya paling rendah sampai yang paling tinggi;
 – aturan Hund, menyatakan bahwa elektron-elektron tidak boleh berpasangan sebelum seluruh orbital setingkat terisi oleh sebuah elektron;
 – asas larangan Pauli, menyatakan bahwa dalam suatu atom tidak boleh ada elektron yang memiliki keempat bilangan kuantum sama.
9. Spektrum emisi adalah spektrum yang dihasilkan oleh pancaran gelombang elektromagnetik.
10. Spektrum absorpsi adalah spektrum yang terjadi karena penyerapan panjang gelombang tertentu dari suatu sumber cahaya.
11. Energi ionisasi adalah banyaknya energi yang diperlukan elektron terluar untuk lepas dari ikatan (pengaruh inti atom).
12. Afinitas elektron adalah energi yang dilepaskan jika suatu atom menangkap sebuah elektron.
13. Elektron valensi adalah elektron yang paling berperan dalam menentukan sifat Fisika dan Kimia suatu atom dan terletak pada kulit paling luar.

Peta Konsep



Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, tentu Anda telah memahami bagaimana perkembangan model atom sampai terakhir digunakan model atom Bohr. Anda juga tentu telah paham bagaimana kedudukan dan sifat elektron dalam bab inti. Dari semua materi yang ada dalam bab ini, bagian manakah yang menurut Anda sulit dipahami? Coba Anda diskusikan bersama teman atau guru Fisika Anda.

Sekarang Anda menjadi tahu bahwa rekayasa atom untuk dimanfaatkan dalam kehidupan bergantung sekali pada elektron valensi atom. Coba Anda cari manfaat lain yang diperoleh setelah mempelajari bab ini, kemudian diskusikan konsep Fisika apa yang terkandung di dalamnya bersama teman Anda.

Tes Kompetensi Bab 8

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling benar.

1. Pernyataan yang merupakan teori atom menurut Dalton adalah
 a. bagian terkecil dari suatu atom adalah elektron
 b. elektron dari suatu unsur sama dengan elektron unsur lain
 c. sebagian besar massa atom terkumpul pada intinya
 d. atom dari suatu unsur tidak dapat bergabung dengan atom unsur lain
 e. atom dari unsur-unsur yang sama memiliki sifat yang sama pula
2. Pernyataan yang tidak berhubungan dengan model atom Thomson adalah
 a. atom bukan partikel dari suatu unsur
 b. muatan positif tersebar merata dalam inti atom
 c. elektron pada atom tersebar merata di antara muatan positif
 d. elektron adalah bagian dari atom yang bemuatan negatif
 e. elektron memiliki massa yang sama dengan muatan proton
3. Salah satu pernyataan dalam teori atom menurut pendapat Rutherford adalah
 a. atom terdiri atas inti yang bermuatan positif dan elektron yang bermuatan negatif yang bergerak mengelilingi inti
 b. hampir seluruh massa atom tersebar di seluruh bagian atom
 c. pada reaksi Kimia, inti atom mengalami perubahan
 d. Pada reaksi Kimia, elektron pada lintasan terluar saling memengaruhi
 e. inti atom merupakan elektron bermuatan positif
4. Kesimpulan dari percobaan hamburan Rutherford adalah
 a. atom merupakan bagian terkecil dari suatu benda
 b. massa atom tersebar merata dalam atom
 c. elektron merupakan bagian atom yang bermuatan listrik negatif
 d. atom berbentuk bola pejal
 e. massa atom terpusat pada satu tempat kecil yang disebut inti
5. Dalam model atom Bohr, energi yang dibutuhkan oleh elektron atom hidrogen untuk berpindah dari orbit dengan bilangan kuantum utama 1 ke-3 adalah
 a. 1,50 *e*V
 b. 1,90 *e*V
 c. 2,35 *e*V
 d. 12,10 *e*V
 e. 13,60 *e*V
6. Jika elektron berpindah dari kulit M ke kulit K pada atom hidrogen dan *R* adalah konstanta Rydberg, panjang gelombang yang terjadi besarnya
 a. $\frac{8}{9}R$
 b. $\frac{9}{8}R$
 c. $\frac{17}{9}R$
 d. $\frac{9}{17}R$
 e. $\frac{1}{R}R$
7. Jika konstanta Rydberg = $1{,}097 \times 10^{7}\ m^{-1}$, panjang gelombang terbesar pada deret Lyman adalah
 a. 912 Å
 b. 1.000 Å
 c. 1.215 Å
 d. 2.115 Å
 e. 6.541 Å
8. Konsep model atom Bohr dan model atom Rutherford berbeda dalam menjelaskan
 a. inti dan elektron sebagai bagian atom
 b. jenis muatan listrik dalam atom
 c. massa atom yang terpusat di inti
 d. energi elektron yang beredar mengelilingi inti
 e. pemancaran gelombang elektromagnetik
9. Salah satu ketentuan Bohr dalam model atomnya adalah
 a. elektron pada lintasan stasionernya memancarkan energi
 b. elektron yang berpindah dari lintasan dengan energi tinggi ke lintasan dengan energi yang lebih rendah akan memancarkan foton
 c. elektron pada lintasan stasionernya menyerap energi
 d. elektron mengelilingi inti pada lintasan tertentu memiliki momentum linier
 e. elektron pada lintasan dengan energi paling rendah tidak tereksitasi
10. Energi foton sinar tampak yang dipanaskan atom hidrogen ketika terjadi transisi elektron dari kulit ke-4 ke kulit ke-2 adalah
 a. 13,6 *e*V
 b. 6,8 *e*V
 c. 3,4 *e*V
 d. 2,55 *e*V
 e. 54,4 *e*V
11. Pada model atom Bohr, elektron atom hidrogen bergerak dengan orbit lingkaran dengan laju sebesar $2{,}2 \times 10^{6}$ m/s. Besarnya arus pada orbit tersebut ($e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ coulomb, $m_e = 9{,}1 \times 10^{-31}$ kg) adalah
 a. 1,06 pÅ
 b. 1,06 nÅ
 c. 1,06 μ Å
 d. 1,06 mÅ
 e. 1,06 Å
12. Jika energi elektron atom hidrogen pada lintasan dasar = –13,6 eV, energi ionisasi pada atom H yang berasal dari lintasan $n = 3$ adalah
 a. 1,51 eV
 b. 4,53 eV
 c. 9,07 eV
 d. 10,60 eV
 e. 12,09 eV

13. Elektron atom hidrogen model Bohr mengelilingi intinya pada lintasan n. Jika energi ionisasi atom inti bernilai $\frac{1}{6}$ kali energi ionisasi atom ini dalam keadaan dasarnya, nilai n itu adalah
 a. 2 d. 16
 b. 4 e. 32
 c. 8

14. Besar energi yang dipancarkan saat elektron tereksitasi atau mengalami transisi dari $n = 4$ ke n pada spektrum hidrogen
 a. 17,52 eV d. 12,75 eV
 b. 14,49 eV e. 10,20 eV
 c. 13,60 eV

15. Elektron atom hidrogen transisi menghasilkan frekuensi terkecil pada deret Lyman. Jika energi yang dipancarkan pada saat itu adalah
 a. 17,0 eV d. 10,2 eV
 b. 13,6 eV e. 6,8 eV
 c. 13,3 eV

16. Berikut ini diberikan bilangan kuantum utama n, dan bilangan orbital ℓ, dari empat buah elektron. Yang merupakan elektron jenis p adalah

	n	ℓ
P	2	1
Q	2	0
R	2	2
S	3	1

 a. P, Q, R d. P, S
 b. P, R e. S
 c. Q, S

17. Sinar ultraviloet akan dipancarkan oleh atom hidrogen jika elektron berpindah dari
 a. lintasan 1 ke lintasan 2
 b. lintasan 2 ke lintasan 4
 c. lintasan 3 ke lintasan 2
 d. lintasan 4 ke lintasan 1
 e. lintasan 4 ke lintasan 2

18. Pasangan-pasangan bilangan kuantum berikut ini yang dapat menggambarkan keadaan salah satu elektron kulit terluar atom $_{11}$Na adalah

	n	l	ml	m_s
a.	2	0	1	$+\frac{1}{2}$
b.	2	1	0	$+\frac{1}{2}$
c.	3	0	0	$+\frac{1}{2}$
d.	3	1	0	$+\frac{1}{2}$
e.	4	0	1	$+\frac{1}{2}$

19. Untuk bilangan kuantum orbital $l = 2$, nilai bilangan kuantum magnetik m_s yang mungkin adalah
 a. nol
 b. $-1, 0, +1$
 c. $-2, 0, +2$
 d. $-1, -2, 0, +1, +2$
 e. $-1, -2, -3, 0, +1, +2, +3$

20. Perbandingan antara panjang gelombang garis pertama deret Lymann dan panjang gelombang garis kedua Balmer pada spektrum atom hidrogen adalah
 a. 1 : 1 d. 1 : 4
 b. 1 : 2 e. 4 : 1
 c. 2 : 1

21. Afinitas elektron adalah
 a. energi yang dibebaskan pada saat pembentukan ion negatif
 b. energi yang diserap pada saat pembentukan ion negatif
 c. energi yang dibebaskan pada saat pembentukan ion positif
 d. energi yang diserap pada saat pembentukan ion positif
 e. sama dengan energi ionisasi

22. Unsur yang memiliki tujuh elektron valensi adalah
 a. $_{9}$F d. $_{11}$Na
 b. $_{14}$Si e. $_{6}$C
 c. $_{20}$Ca

23. Berikut pernyataan yang benar tentang unsur, *kecuali*
 a. unsur yang atomnya mudah membentuk ion negatif disebut unsur elektronegatif
 b. unsur-unsur yang memiliki elektron valensi kurang dari empat merupakan unsur yang elektronegatif
 c. unsur-unsur yang memiliki elektron valensi lebih dari empat merupakan unsur yang elektronegatif
 d. unsur elektropositif adalah unsur yang sulit menangkap elektron
 e. unsur yang mudah berubah menjadi ion negatif disebut unsur yang elektronegatif

24. Suatu garis spektral di spektrum hidrogen memiliki panjang gelombang 821 nm. Perbedaan energi antara keua tingkat energi yang membentuk garis tersebut adalah
 a. 1,00 eV d. 3,5 eV
 b. 1,51 eV e. 4,10 eV
 c. 2,1 eV

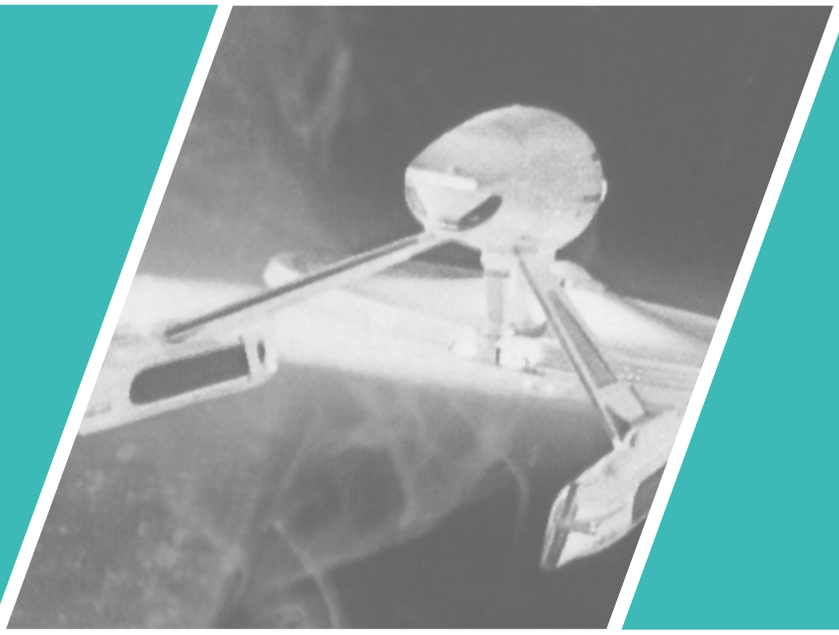
25. Bilangan-bilangan kuantum berikut ini adalah suatu kumpulan yang mungkin dari bilangan-bilangan kuantum untuk sebuah elektron dalam orbital 3*d* adalah
 a. $n = 3;\ l = 3;\ m_l = 1;\ m_s = \frac{1}{2}$
 b. $n = 3;\ l = 2;\ m_l = -2;\ m_s = \frac{1}{2}$
 c. $n = 3;\ l = -2;\ m_l = 0;\ m_s = \frac{1}{2}$
 d. $n = 3;\ l = 2;\ m_l = 3;\ m_s = \frac{1}{2}$
 e. $n = 3;\ l = -2;\ m_l = 2;\ m_s = \frac{1}{2}$

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan tepat.

1. Sebutkan dua hal yang terkandung dalam model atom Rutherford dan Bohr.
2. Jelaskan perbedaan antara model atom Rutherford dan Bohr.
3. Hitunglah panjang gelombang terpendek dari:
 a. deret Lyman
 b. deret Paschen
 c. deret Pfund
4. Sebuah atom hidrogen pada keadaan dasar menyerap sebuah foton sehingga mengalami eksitasi ke orbit ke-4. Tentukanlah panjang gelombang dan frekuensi foton.
5. Suatu berkas elektron ditambahkan pada gas hidrogen. Jika dihasilkan pemancaran spektrum yang berasal dari transisi $n = 3$ ke keadaan $n = 2$, sedangkan energi ikat elektron pada tingkat dasar sama dengan 13,6 eV, tentukan energi minimum elektron.
6. Jelaskan dengan bagan, konfigurasi elektron dari atom lithium.
7. Tentukan energi elektron pada keadaan dasar ($n = 1$) untuk
 a. atom hidrogen,
 b. ion He^{+} ($z = 2$),
 c. ion Li^{2+} ($z = 3$).

 Nyatakan jawaban Anda dalam satuan eV.
8. Energi total elektron Li^{2+} pada suatu orbit tertentu adalah 4,90 eV. Berapakah bilangan kuantum utama orbit tersebut?
9. Atom kalium memiliki nomor atom 19.
 a. Tentukan konfigurasi elektron atom tersebut.
 b. Mengapa kalium sangat reaktif secara kimia dan cenderung membentuk ion K^{+}?

Bab 9



Sumber: *Jendela IPTEK, Energi*

Pesawat ruang angkasa *Starship Enterprise* dalam serial televisi *Star Trek* seringkali berjalan dengan kecepatan cahaya.

Teori Relativitas Khusus

Hasil yang harus Anda capai:

menganalisis berbagai besaran fisis pada gejala kuantum dan batas-batas berlakunya relativitas Einstein dalam paradigma Fisika Modern.

Setelah mempelajari bab ini, Anda harus mampu:

memformulasikan teori relativitas khusus untuk waktu, panjang, dan massa, serta kesetaraan massa dengan energi yang diterapkan dalam teknologi

Apakah Anda tahu mengapa manusia belum bisa menjelajahi planet dan bintang di luar tata surya? Salah satu kendala yang dihadapai adalah jumlah bahan bakar yang dibutuhkan sangat banyak karena jarak tempuhnya bisa berorde tahunan cahaya. Dalam film-film fiksi ilmiah, perjalanan seperti itu merupakan hal yang biasa karena pesawat yang digunakan memiliki kecepatan yang sangat tinggi. Misalnya dalam film *Star Trek*, pesawat yang bernama *Starship Enterprise* mampu berjalan dengan kecepatan orde cahaya. Tahukah Anda apa hubungan antara jarak dengan kecepatan cahaya? Jika suatu benda bergerak dengan kecepatan cahaya, teori relativitas khusus akan berlaku. Salahsatu implikasi dari penerapan teori relativitas khusus adalah terjadinya kontraksi (penyusutan) panjang sehingga jarak tempuhnya semakin pendek.

Selain kontraksi panjang, masih banyak lagi pengaruh yang diakibatkan oleh benda yang bergerak dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya. Banyak hal yang terkesan tidak masuk akal. Akan tetapi, jika ditinjau dengan menggunakan teori relativitas khusus ternyata ilmiah dan dapat dibuktikan. Fenomena-fenomea menarik tersebut akan Anda pelajari pada bab ini.

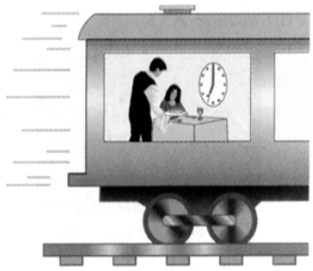
A. Semua Gerak Bersifat Relatif

B. Teori Relativitas Einstein

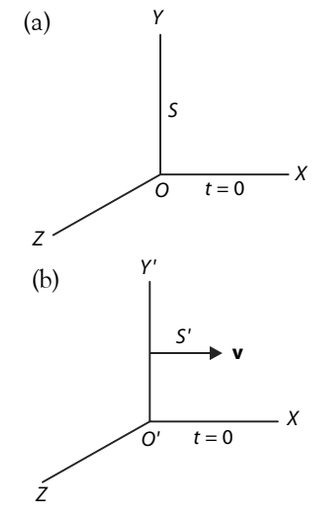
Tes Kompetensi Awal

Sebelum mempelajari konsep Teori Relativitas Khusus, kerjakanlah soal-soal berikut dalam buku latihan.

1. Ketika Anda melihat pohon-pohon dari dalam mobil yang sedang bergerak, pohon-pohon terlihat bergerak ke arah yang berlawanan dari arah gerak mobil. Pohon tersebut dikatakan bergerak relatif terhadap Anda yang diam. Dari ilustrasi tersebut, coba Anda simpulkan apakah gerak relatif itu?
2. Jika Anda berlari dengan kecepatan 20 km/jam ke arah depan didalam kereta api yang sedang bergerak dengan kecepatan 60 km/jam, berapa kecepatan total Anda menurut pengamat yang diam di pinggir rel kereta?
3. Jika kecepatan cahaya ditembakkan dari pesawat supersonik yang memiliki kecepatan sama dengan kecepatan bunyi, mungkinkah kecepatan cahaya tersebut lebih dari 3×10^8 m/s? Apa alasannya?
4. Apa yang dimaksud dengan eter? Percobaan apakah yang menggugurkan teori adanya eter?



Gambar 9.1
Menurut pengamat di luar kereta api, penumpang sedang bergerak dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan kereta api.



Gambar 9.2
(a) Kerangka acuan S dalam keadaan diam;
(b) Kerangka acuan S' dalam kecepatan konstan *v*;
(c) Setelah selang waktu *t*, berada jauh *vt* dari titik koordinat S'.

A. Semua Gerak Bersifat Relatif

Semua benda dikatakan bergerak jika kedudukan benda itu berubah terhadap titik acuan atau kerangka acuan yang ditetapkan. Seorang siswa yang sedang duduk di dalam kereta api yang bergerak, dikatakan diam (tidak bergerak) jika kerangka acuannya kereta api. Akan tetapi, seorang pengamat di luar kereta api mengatakan siswa tersebut bergerak dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan kereta api. Sama halnya gerak sebuah perahu tersebut aliran air sungai. Perahu dan arus sungai bergerak terhadap Bumi. Contoh di atas menunjukkan bahwa tidak ada benda yang bergerak mutlak yang ada hanyalah gerak relatif.

Teori Newton telah berhasil menjelaskan peristiwa sebuah benda yang bergerak dengan kecepatan rendah, seperti contoh-contoh gerak tersebut. Akan tetapi, teorinya tidak berhasil menjelaskan peristiwa benda yang bergerak mendekati kecepatan cahaya, seperti sejumlah elektron yang dipercepat melalui beda potensial 10 MeV akan mencapai kecepatan 0,9 *c*. Menurut mekanika Newton, bahwa kecepatan elektron akan menjadi 1,8 *c* jika dipercepat dengan potensial sebesar 40 MeV. Kenyataan menunjukkan bahwa kecepatan elektron tetap saja sebesar 0,9 *c*. Jelaslah mekanika Newton tidak dapat dipakai untuk benda-benda yang bergerak mendekati kecepatan cahaya.

1. Transformasi Galileo

Prinsip relativitas Galileo dikenal juga sebagai prinsip relativitas klasik karena hanya berkaitan dengan hukum-hukum gerak Newton. Contohnya pengamatan terhadap seorang siswa yang sedang duduk di dalam kereta api yang bergerak oleh dua orang pengamat sebagai dua kerangka acuan berbeda.

Contoh tersebut dapat digambarkan dengan menggunakan sistem koordinat kerangka acuan, hal tersebut dilukiskan seperti **Gambar 9.2**. Dalam transformasi yang akan diturunkan ini, selang waktu yang dicatat oleh pengamat di S dan S' dianggap sama.

Gambar 9.2 memperlihatkan dua kerangka acuan S dan S'. Kerangka acuan S' terhadap acuan S bergerak ke kanan sepanjang sumbu-*x* dengan kecepatan tetap (*v*). Pada kerangka acuan inersial berlaku *Hukum Kelembaman Newton*. Kerangka acuan inersial tidak mengalami percepatan.

Misalkan, dua orang pengamat *A* dan *B* masing-masing berada dalam kerangka acuan S dan S'. Pengamat *A* yang berada di stasiun, dianggap berada pada kerangka acuan S yang diam. Adapun pengamat *B* berada

pada kerangka acuan S' yang bergerak. Mula-mula S dan S' berimpit dan setelah t sekon, S' sudah menempuh jarak $d = vt$.

Sebuah benda P bergerak ke kanan dengan kecepatan u_x. Pada saat t sekon, benda P terhadap kerangka acuan S memiliki koordinat $P\ (x, y, z)$ dan terhadap kerangka acuan S' memiliki koordinat $P\ (x', y', z')$ sehingga

$$x' = x - vt,\ y' = y,\ z' = z \qquad (9\text{–}1)$$

Dengan anggapan, waktu yang diamati oleh pengamat pada kerangka acuan S sama dengan waktu yang diamati oleh pengamat dalam kerangka acuan S' yang bergerak,

$$t' = t \qquad (9\text{–}2)$$

Persamaan (9–1) dan **(9–2)** dikenal dengan transformasi Galileo. Transformasi kebalikannya adalah

$$x = x' + vt;\ y = y';\ z = z';\ t' = t \qquad (9\text{–}3)$$

Oleh karena $t = t'$, turunan x' atau x terhadap t' sama dengan turunan x' atau x terhadap t. Jika **Persamaan (9–1)** diturunkan terhadap waktu t, akan diperoleh kecepatan

$$\frac{dx'}{dt} = \frac{d(x - vt)}{dt} \Rightarrow \frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt} - \frac{d(vt)}{dt}$$

Jika $\frac{dx'}{dt} = u'_x$ adalah kecepatan benda P terhadap S', $\frac{dx}{dt} = u_x$ adalah kecepatan benda P terhadap S, dan $\frac{d}{dt}(vt) = v$, akan diperoleh sebuah bentuk persamaan

$$u'_x = u_x - v \qquad (9\text{–}4)$$

Pada sumbu-y berlaku $y' = y$ pada sumbu-z berlaku $z' = z$.

$$\frac{dy'}{dt} = \frac{dy}{dt};\ \frac{dz'}{dt} = \frac{dz}{dt}$$

$$u'_y = u_y;\ u'_z = u_z$$

Atau

$$u'_x = u_x - v,\ u'_y = u_y,\ u'_z = u_z \qquad (9\text{–}5)$$

transformasi kebalikannya adalah

$$u_x = u'_x + v,\ u_y = u'_y,\ u_z = u'_z \qquad (9\text{–}6)$$

Keterangan

u'_x = kecepatan benda sejajar x'

u'_y = kecepatan benda sejajar y'

u'_z = kecepatan benda sejajar z'

Kecepatan diturunkan terhadap waktu akan menghasilkan percepatan

$$a'_x = \frac{du'_x}{dt} = \frac{du_x}{dt} = a_x$$

$$a'_y = \frac{du'_y}{dt} = \frac{du_y}{dt} = a_y \qquad (9\text{–}7)$$

$$a'_z = \frac{du'_z}{dt} = \frac{du_z}{dt} = a_z$$



Tantangan untuk Anda

Berilah contoh ilustrasi transformasi Galileo yang ada di sekitar Anda.

Berdasarkan **Persamaan (9–7)**, dapat dikatakan bahwa percepatan benda *P* dalam kerangka acuan *S'* sama dengan percepatan benda *P* dalam kerangka acuan *S*, $a'=a$. Massa benda *P* dipandang dari kerangka acuan *S* dan *S'* dianggap tetap sama, maka gaya pada kerangka acuan *S* dan *S'* menjadi sama pula, yaitu $F = ma$ dan $F' = ma'$ sehingga $F = F'$.

Dari uraian tersebut, dapat diambil kesimpulan bahwa *Hukum Newton tentang gerak dan persamaan gerak suatu benda tetap sama dalam semua kerangka acuan inersial.*

Contoh 9.1

Sebuah kereta api bergerak dengan kecepatan 52 km/jam. Seorang penumpang berjalan dalam kereta dengan kecepatan 5 km/jam searah dengan kereta. Berapa kecepatan penumpang tersebut terhadap orang yang diam di tepi rel?

Jawab:

Dengan menggunakan **Persamaan (9–4)**: $u'_x = u_x - v$

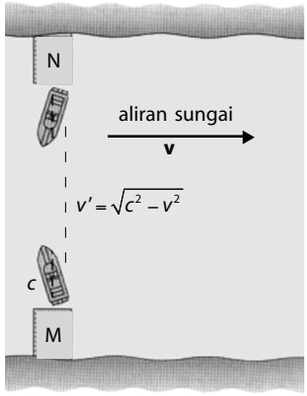
Orang yang diam di tepi rel sebagai kerangka acuan *S*. Kereta api yang bergerak terhadap orang yang diam sebagai kerangka acuan *S'*. Kecepatan penumpang terhadap kerangka acuan *S'* adalah $u_x' = 5$ km/jam. Dengan demikian, kecepatan penumpang u_x terhadap yang diam adalah

$u_x = u'_x + v \Rightarrow 52 + 5 = 57$ km/jam.

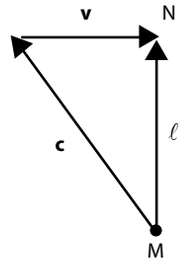
2. Percobaan Michelson–Morley

Gejala yang tampak pada gelombang tali, gelombang permukaan air, atau gelombang bunyi menunjukkan bahwa gelombang dapat merambat melalui suatu medium yang menjalarkan getaran dari suatu tempat ke tempat lainnya. Oleh karena cahaya juga dapat dianggap sebagai gelombang, apakah yang memungkinkan merambatnya gelombang cahaya dari Matahari ke Bumi, sedangkan sebagian besar daerah antara Matahari dan Bumi adalah ruang hampa?

Untuk menjawab pertanyaan ini, pada abad ke-19 para ahli mengajukan suatu hipotesis yang dikenal dengan *hipotesis eter*. Menurut hipotesis ini, gelombang cahaya dari Matahari ke Bumi dapat merambat melalui suatu medium yang dinamakan eter. Medium ini terdapat di mana-mana di alam ini, termasuk ruang hampa. Dengan adanya hipotesis ini untuk sementara dapat menghindarkan kesukaran tentang medium perambatan gelombang cahaya.



Gambar 9.3
Gerak perahu bolak-balik yang tegak lurus aliran sungai.



Gambar 9.4
Diagram arah kecepatan perahu dan aliran sungai.

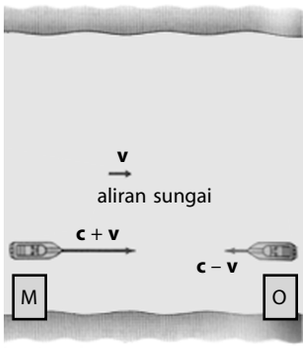
Pada 1887, **A.A. Michelson** dan **E.W. Morley** melakukan eksperimen untuk membuktikan keberadaan eter. Eksperimen ini dilakukan dengan mengukur selisih waktu antara kelajuan cahaya ketika bergerak sejajar dan tegak lurus eter. Agar Anda dapat memahami eksperimen Michelson-Morley ini, perhatikan ilustrasi tentang gerak perahu yang bergerak searah dengan aliran sungai dan gerak perahu yang bergerak menyeberangi sungai (tegak lurus dengan aliran sungai). Pada **Gambar 9.3,** perahu A bergerak pulang pergi menyeberangi sungai dari titik M ke N dan kembali ke M lagi, dengan arah tegak lurus aliran sungai yang bergerak dengan kecepatan *v*. Untuk melakukan penyeberangan ini, arah gerakannya harus dimiringkan ke kiri untuk mengimbangi arus sungai, seperti diperlihatkan pada **Gambar 9.3**. Besar resultan dari kecepatan perahu *c* dan kecepatan aliran sungai *v* dapat dituliskan sebagai berikut.

$$|v'| = \sqrt{c^2 - v^2} \qquad (9\text{–}8)$$

Jika panjang lintasan M ke N adalah l, waktu yang diperlukan untuk menyeberangi sungai adalah $\frac{\ell}{v'}$. Jadi, untuk pulang pergi menyeberangi sungai dibutuhkan waktu

$$t_A = \frac{2\ell}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2\ell}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad (9\text{–}9)$$

Sekarang, perhatikan **Gambar 9.5.** Perahu B bergerak bolak-balik dari titik M ke O lalu kembali ke M lagi. Panjang lintasan dari M ke O sama dengan panjang lintasan dari M ke N, yaitu l. Pada separuh perjalanannya yang pertama, kecepatannya dibantu oleh aliran sungai sehingga untuk menempuh sejauh ℓ diperlukan waktu $\frac{\ell}{c + v}$. Akan tetapi, pada waktu separuh perjalanannya untuk kembali, geraknya justru melawan arus sehingga diperlukan waktu $\frac{\ell}{c - v}$ untuk menempuh jarak yang sama, yaitu sepanjang ℓ. Dengan demikian, seluruh perjalanan perahu B pulang pergi memerlukan waktu



Gambar 9.5
Gerak perahu yang searah dan berlawanan dengan aliran sungai.

$$t_B = \frac{\ell}{c + v} + \frac{\ell}{c - v}$$

Bentuk tersebut dapat ditulis juga dengan

$$t_B = \frac{\ell(c - v) + \ell(c + v)}{(c + v)(c - v)}$$

$$t_B = \frac{\ell c - \ell v + \ell c + \ell v}{c^2 - v^2} = \frac{2\ell c}{c^2 - v^2}$$

Persamaan tersebut dapat juga dituliskan

$$t_B = \frac{2\ell c}{c^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

$$t_B = \frac{2\ell}{c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \qquad (9\text{–}10)$$

Untuk kasus gerak Bumi di dalam eter, digunakan analogi sebagai berikut. Kelajuan sungai dianalogikan sebagai kelajuan eter dan kelajuan perahu dianalogikan sebagai cahaya. Dalam konteks ini, t_A berarti waktu yang ditempuh cahaya ketika lintasannya tegak lurus dengan arah kelajuan eter, sedangkan t_B adalah waktu yang ditempuh cahaya ketika lintasannya sejajar terhadap arah kelajuan eter. Selisih waktu antara t_B dan t_A adalah

Ingatlah

$a^2 - b^2 = (a + b)(a - b)$

$$t_B - t_A = \frac{2\ell}{c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} - \frac{2\ell}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t_B - t_A = \frac{2\ell}{c}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1} - \frac{2\ell}{c}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \qquad (9\text{–}11)$$

Tantangan untuk Anda

Agar Anda lebih memahami tentang deret binomial. Kerjakan contoh-contoh berikut.

1. $(1 - x^2)^3$
2. $(1 + 2x)^3$

Untuk menyelesaikan persamaan tersebut, digunakan deret binomial, yaitu

$$(1 + x)^n = 1 + \binom{n}{1}x + \binom{n}{2}x^2 + \binom{n}{3}x^3 + ... + \binom{n}{n}x^n$$

dan

$$\boxed{\binom{n}{k} = \frac{n(n-1)(n-2)...(n-k+1)}{k}} \qquad (9\text{–}12)$$

Suku $\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-1}$ pada **Persamaan (9–11)** dapat dituliskan dalam bentuk deret binominal dengan menganalogikan $\left(-\frac{v^2}{c^2}\right)$ sebagai x dan pangkat -1 sebagai n, maka akan didapatkan

$$\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-1} = 1 + nx + n\,(n-1)\,\frac{x^2}{2} + ...$$

$$= 1 + \frac{v^2}{c^2} + \frac{2v^4}{c^4} + ...$$

Oleh karena $c = 10^8$ m/s dan v berorde kecil, nilai $\frac{v^4}{c^4}$ sangat kecil sekali sehingga $\frac{v^4}{c^4} \approx 0$. Jadi, persamaan deret nominal tersebut dapat dituliskan

$$\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-1} = 1 + \frac{v^2}{c^2}$$

Dengan cara yang sama, maka $\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$ dapat dituliskan dalam bentuk deret nominal sebagai berikut.

$$\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{v^2}{2c^2}$$

maka

$$t_B - t_A = \frac{2\ell}{c}\left(1+\frac{v^2}{c^2}\right) - \frac{2\ell}{c}\left(1+\frac{v^2}{2c^2}\right)$$

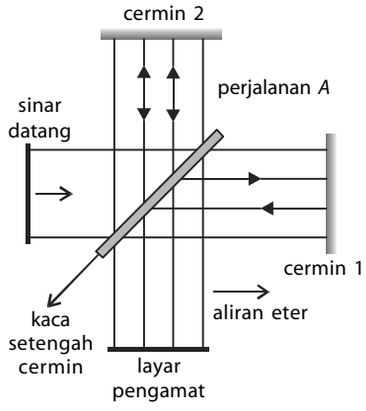
$$t_B - t_A = \frac{2\ell}{c}\,\frac{v^2}{c^2} - \frac{2\ell}{c}\,\frac{v^2}{2c^2}$$

$$\boxed{t_B - t_A = \frac{\ell}{c}\,\frac{v^2}{c^2}} \qquad (9\text{–}13)$$

Pada percobaan Michelson–Morley yang skemanya terlihat pada **Gambar 9.6**, panjang lintasan (ℓ) yang digunakan adalah 11 m. Adapun kelajuan eter (v) adalah kelajuan rotasi Bumi, yaitu 3×10^4 m/s. Oleh karena itu, selisih waktu cahaya yang sejajar eter dan tegak lurus eter dapat dihitung.

$$t_B - t_A = \frac{(11\text{m})}{3\times10^8\ \text{m/s}}\,\frac{\left(3\times10^4\ \text{m/s}\right)^2}{\left(3\times10^8\ \text{m/s}\right)^2}$$

$$= 3{,}7 \times 10^{-16}\ \text{s}$$



Gambar 9.6
Skema percobaan Michelson-Morley.

Selisih waktu ini sangat kecil dan tidak mungkin diamati secara manual. Namun, jika digunakan cara-cara optik hal ini akan memberikan ketelitian yang sangat tinggi. Salah satunya melalui pola interferensi. Berkas cahaya yang dipantulkan dan diteruskan oleh kaca setengah cermin, tentu memiliki fase yang berbeda sehingga akan terlihat suatu pola interferensi. Jika diamati melalui layar pengamat, akan memperlihatkan perbedaan tersebut. Ternyata, percobaan Michelson-Morley sangat mengejutkan karena dari hasil pengamatan terhadap pola interferensi tidak terlihat perbedaan fase. Hal ini berarti bahwa tidak terdapat perbedaan antara waktu yang diperlukan oleh cahaya untuk pulang pergi dalam arah sejajar dengan aliran eter dan arah tegak lurus terhadap aliran eter.

Dua hal penting yang dapat disimpulkan dari percobaan Michelson–Morley yaitu sebagai berikut.

a. Hipotesis tentang medium yang disebut eter tidak dapat dibuktikan. Dengan kata lain, eter itu tidak ada.
b. Kecepatan cahaya adalah sama untuk segala arah, tidak bergantung pada gerak Bumi.

Kata Kunci

- transformasi Galileo
- kerangka acuan
- eter
- kecepatan cahaya

Tes Kompetensi Subbab A

Kerjakanlah pada buku latihan.

1. Bagaimanakah pandangan manusia terhadap jalannya perambatan gelombang cahaya dari Matahari sampai di Bumi pada abad ke-18? Bagaimanakah pula permasalahan tersebut diselesaikan pada awal abad ke-19?
2. Mengapa semua gerak benda dapat dikatakan gerak relatif dan bagaimanakah kedudukan antara gerak relatif yang satu dan yang lainnya? Jelaskan.
3. Terangkan keterkaitan Hukum Newton dan transformasi Galileo.
4. Sebutkan latar belakang para fisikawan abad ke-19 dalam meyakini adanya eter!
5. Terangkan metode percobaan Morley-Michelson dan kesimpulan apakah yang dapat diperoleh dari percobaan Morley-Michelson?

B. Teori Relativitas Einstein

Hasil percobaan Michelson-Morley membuktikan bahwa eter sebagai medium rambatan cahaya itu tidak ada. Pada 1905, **Albert Einstein** mengusulkan suatu teori tentang kecepatan cahaya. Teori ini menyatakan bahwa, *besar kecepatan cahaya adalah sama untuk semua arah dan berlaku untuk semua tempat di jagat raya ini dengan tidak bergantung pada jarak sumber maupun pengamatnya*. Teori ini disebut *teori relativitas khusus*. Einstein mengemukakan dua postulatnya, yaitu sebagai berikut.

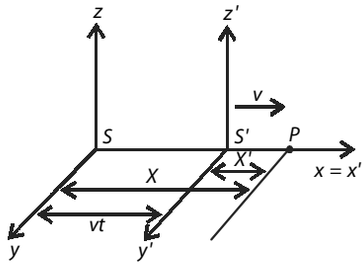
1. Kelajuan cahaya di ruang hampa ke segala arah adalah mutlak tidak bergantung pada gerak sumber cahaya maupun pengamat.
2. Hukum-hukum fisika (mekanika Newton) memiliki bentuk yang sama pada semua kerangka acuan inersial.

Postulat pertama muncul akibat implikasi besaran-besaran fisis yang sangat luas di mana Hukum Mekanika Newton, seperti kecepatan tidak berlaku untuk cahaya. Menurut **Einstein**, waktu t' tidak sama dengan t sehingga relativitas Newton dan transformasi Galileo tidak dapat digunakan. Besaran kecepatan, waktu, panjang, dan massa benda semuanya bersifat relatif.

1. Transformasi Lorentz

Dari uraian sebelumnya diketahui bahwa transformasi Galileo tidak dapat digunakan untuk menjelaskan teori Einstein. Untuk menjelaskan teori Einstein ini, digunakan transformasi Lorentz. Transformasi yang dikemukakan oleh **Lorentz** berlaku umum. Artinya, transformasi ini tidak hanya berlaku untuk kecepatan-kecepatan yang mendekati kecepatan cahaya, tetapi juga berlaku untuk kecepatan-kecepatan yang jauh lebih kecil dari kecepatan cahaya.

Perhatikan **Gambar 9.7**. Menurut transformasi Galileo didapatkan $x = x' + vt$. Titik S dan S' masing-masing merupakan pusat koordinat dari siku-siku xyz dan x' y' z'. Pada $t = 0$, kedua sumbu berimpit. Sumbu x' y' z' bergeser ke kanan sepanjang sumbu-x dengan kecepatan tetap v. Setelah t sekon, jarak SS' adalah $\ell = v\,t$. Untuk titik P yang terletak pada sumbu-x', jika koordinatnya dinyatakan dengan x dan x' akan memenuhi hubungan



Gambar 9.7
Dua kerangka acuan S dan S', dengan S' memiliki kecepatan (v) relatif terhadap S.

$$x = x' + \ell$$
$$x = x' + vt \qquad (9\text{–}14)$$

Dalam hal ini, pengamat di S dan S' menggunakan selang waktu yang dimulai pada saat bersamaan. Seandainya titik P juga bergerak ke kanan sepanjang sumbu x' dengan kecepatan tetap terhadap pengamat kedua di S' sebesar v, kedudukan terhadap sumbu-x dan x', yaitu

$$\begin{aligned} &\text{untuk } t = t_1 \Rightarrow x_1 = x_1' + vt_1 \\ &\text{untuk } t = t_2 \Rightarrow x_2 = x_2' + vt_2 \\ &\text{untuk } t = t_3 \Rightarrow x_3 = x_3' + vt_3 \end{aligned} \qquad (9\text{–}15)$$

Jadi, baik pengamat pertama (S) maupun pengamat kedua (S') menggunakan waktu t_1, t_2, t_3, ..., t_n. Akan tetapi, jika selang waktu pengamat pertama dan pengamat kedua dibedakan dengan t dan t'. Untuk pengamat pertama adalah t_1, t_2, t_3, ..., t_n dan untuk pengamat kedua adalah t_1', t_2', t_3', ..., t_n'. **Persamaan (9–15)** perlu dinyatakan dalam t', hal ini berarti Anda dapat mengalikan dengan suatu konstanta γ yang disebut *tetapan transformasi*. Dengan demikian, jika transformasi ini dianggap linear, **Persamaan (9–14)** menjadi

$$x = \gamma\ (x' + vt') \qquad (9\text{–}16)$$

Jika kerangka acuan S' terhadap kerangka acuan S bergerak ke kanan dengan kecepatan tetap v, kerangka acuan S terhadap S' dapat dianggap bergerak relatif ke kiri dengan kecepatan v. Hubungan x dan x' menjadi

$$x' = \gamma\ (x - vt) \qquad (9\text{–}17)$$

Substitusikan **Persamaan (9–16)** ke dalam **Persamaan (9–17)** sehingga

$$x = \gamma\,[\gamma\,(x - vt) + vt'] \Rightarrow x = \gamma^2\,(x - vt) + \gamma\,vt'$$

$$t' = \gamma\,t + x\left(\frac{1-\gamma^2}{\gamma\,v}\right) \qquad (9\text{–}18)$$

Misalkan, kecepatan terhadap kerangka acuan S dan S' adalah kecepatan cahaya $u_x' = c_0$. Menurut Einstein, kecepatan cahaya terhadap kerangka acuan pengamat pertama di S sama besarnya, yaitu $u_x = c$. Dari sini didapat hubungan $x = c\,t$ dan $x' = c'\,t'$ sehingga **Persamaan (9–18)** menjadi

$$c\,t' = \gamma\,(x - v\,t) \qquad (9\text{–}19)$$

Dengan mengganti t' pada **Persamaan (9–19)** diperoleh

$$c\left[\gamma t + x\left(\frac{1-\gamma^2}{\gamma v}\right)\right] = \gamma\left(x - vt\right)$$

Untuk menjelaskan persamaan tersebut, ikuti langkah-langkah berikut ini.

1) Kalikan setiap suku sesuai dengan sifat komutatif.

$$c\gamma t + cx\left(\frac{1-\gamma^2}{\gamma v}\right) = \gamma x - \gamma v t$$

2) Kumpulkan suku-suku yang memiliki variabel x di ruas kiri dan yang memiliki variabel t di ruas kanan.

$$cx\left(\frac{1-\gamma^2}{\gamma v}\right) - \gamma x = -\,c\gamma t - \gamma v t$$

3) Kalikan dengan –1.

$$\gamma x - cx\left(\frac{1-\gamma^2}{\gamma v}\right) = c\gamma t + \gamma v t$$

4) Keluarkan variabel x di ruas kiri.

$$x\left[\gamma - \left(\frac{1-\gamma^2}{\gamma v}\right)c\right] = c\gamma t + \gamma v t$$

5) Susun persamaan sehingga di ruas kiri hanya ada variabel x.

$$x = \frac{c\gamma t + \gamma v t}{\gamma - \left(\frac{1-\gamma^2}{\gamma v}\right)c} = ct\left(\frac{\gamma + \frac{\gamma v}{c}}{\gamma - \left(\frac{1-\gamma^2}{\gamma v}\right)c}\right)$$

6) Kalikan dengan $\gamma\,/\gamma$.

$$x = ct\left(\frac{1+\frac{v}{c}}{1-\left(\frac{1}{\gamma^2 v} - \frac{1}{v}\right)c}\right) = ct\left(\frac{1+\frac{v}{c}}{1-\left(\frac{1}{\gamma^2} - 1\right)\frac{c}{v}}\right)$$

Seperti telah dibahas sebelumnya, menurut Einstein $x = ct'$. Oleh karena itu dapat dituliskan:

$$ct' = ct\left(\frac{1-\frac{v}{c}}{1-\left(\frac{1}{\gamma^2} - 1\right)\frac{c}{v}}\right)$$

Tokoh

H.A. Lorentz
(1853–1928)



Sumber: *Science Encyclopedia*, 1998

Hendrik Antoon Lorentz (1853–1928) adalah seorang fisikawan Belanda yang kali pertama mengemukakan tentang pemantulan dan pembiasan cahaya, ditinjau dari teori bahwa cahaya termasuk gelombang elektromagnetik. Teori ini dikembangkan oleh **James Clerk Maxwell** yang menyatakan bahwa cahaya terdiri atas gelombang listrik dan gelombang magnetik dengan sudut yang berbeda. **Lorentz** juga memprediksi keberadaan elektron. Beliau menerima hadiah Nobel tahun 1902 dalam bidang fisika atas penelitiannya mengenai medan magnet. Dalam bab teori relativitas, **Lorentz** berjasa dalam teorinya mengenai "Transformasi Lorentz".

maka

$$\frac{1+\frac{v}{c}}{1-\left(\frac{1}{\gamma^2}-1\right)\frac{c}{v}} = 1$$

$$1+\frac{v}{c} = 1-\left(\frac{1}{\gamma^2}-1\right)\frac{c}{v}$$

$$\frac{v}{c} = -\left(\frac{1}{\gamma^2}-1\right)\frac{c}{v}$$

$$1-\frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{\gamma^2}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad (9\text{–}20)$$



Tantangan untuk Anda

Dengan cara yang sama seperti pada **Persamaan (9–21),** turunkan persamaan transformasi kecepatan relativistik sehingga didapatkan hasil seperti **Persamaan (9–22).**

Akhirnya, hasil transformasi Lorentz dapat ditulis sebagai berikut.

$$x' = \gamma\,(x - vt)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\,(x - vt) = \frac{x - vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}};$$

$$y' = y\ ;\ z' = z \qquad (9\text{–}21)$$

$$t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)$$

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\left(t - \frac{vx}{c^2}\right) = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad (9\text{–}22)$$

Persamaan (9–22) dikemukakan oleh **Hendrik Antoon Lorentz**, seorang fisikawan Belanda, pada 1890. Persamaan tersebut dapat dipakai untuk menghitung partikel-partikel yang bergerak cepat. Transformasi Lorentz ini akan tereduksi menjadi transformasi Galileo apabila kelajuan v jauh lebih kecil dari kelajuan cahaya ($v <<< c$).

2. Transformasi Kecepatan dari Lorentz

Postulat relativitas khusus menyatakan bahwa kelajuan cahaya dalam ruang hampa memiliki harga yang sama untuk semua pengamat, tidak bergantung pada gerak relatifnya. Seberkas cahaya yang dipancarkan dalam kerangka acuan S' pada arah geraknya dengan kelajuan v relatif terhadap kerangka S akan memiliki kelajuan $c + v$ diukur dari S.

Sekarang, Anda tinjau sesuatu yang bergerak relatif terhadap keduanya, yaitu S dan S'. Pengamat di S mengukur ketiga komponen kecepatan dalam S, yaitu

$$v_x = \frac{dx}{dt};\ V_y = \frac{dy}{dt};\ v_z = \frac{dz}{dt}$$

Adapun pengamat dalam S' mendapat $v_x' = \frac{dx'}{dt};\ V_y' = \frac{dy'}{dt'};\ v_z' = \frac{dz'}{dt'}$

Dengan mendifferensialkan **Persamaan (9–22)**, diperoleh

$$dx' = \frac{dx - v\,dt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}};\ dy = dy';\ dz = dz'$$

$$dt' = \frac{dt - \left(\frac{v}{c^2}\right)dx}{\sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}}$$

sehingga

$$d_x' = \frac{dx'}{dt'} = \frac{\frac{dx - vdt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}}{\frac{dt - \left(\frac{v}{c^2}\right)dx}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}} = \frac{dx - vdt}{dt - \frac{v}{c^2}dx} \Rightarrow v_x' = \frac{\frac{dx}{dt} - v}{1 - \left(\frac{v}{c^2}\right)\frac{dx}{dt}}$$



Tantangan untuk Anda

Dengan menggunakan transformasi Lorentz, buktikan bahwa kecepatan cahaya untuk pengamat yang diam dan pengamat yang bergerak dengan kecepatan v adalah sama.

$$v_x' = \frac{v_x - v}{1 - \frac{v_x v}{c^2}} \quad \text{atau} \quad v_x = \frac{v_x' + v}{1 + \frac{v v_x}{c^2}} \qquad (9\text{–}23)$$

Dengan cara yang sama, Anda juga akan mendapatkan transformasi kecepatan relativistik untuk sumbu-y dan sumbu-z.

$$v_y' = \frac{v_y\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v_x v}{c^2}}$$

$$v_y = \frac{v_y'\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v\,v_x}{c^2}} \qquad (9\text{–}24)$$

$$v_z' = \frac{v_z\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v_x v}{c^2}}$$

$$v_z = \frac{v_z'\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v\,v_x}{c^2}}$$

Contoh 9.2

Sebuah pesawat angkasa A berkelajuan 0,9 c terhadap Bumi. Jika pesawat angkasa B melewati A dengan kelajuan relatif 0,5 c terhadap pesawat A, berapakah kelajuan pesawat B terhadap Bumi?

Jawab:

Dengan menggunakan **Persamaan (9–23)**, diperoleh

$$v_x = \frac{v_x' + v}{1 + \frac{v\, v_x'}{c^2}}$$

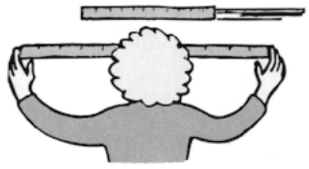
$$v_x = \frac{0{,}5\,c + 0{,}9\,c}{1 + \frac{(0{,}9\,c)(0{,}5\,c)}{c^2}} = 0{,}9655\,c$$

Jadi, kelajuan pesawat *B* relatif terhadap Bumi 0,9655 c (lebih kecil dari kecepatan cahaya).

Menurut mekanika, kecepatan pesawat *B* terhadap Bumi = 0,9 c + 0,5 c = 1,4 c. (ini tidak mungkin)

3. Akibat Prinsip Relativitas Khusus

a. Kontraksi Lorentz



Gambar 9.8
Sebuah meteran yang bergerak sebesar 87% dari kecepatan cahaya, panjangnya hanya terlihat setengahnya oleh pengamat yang diam.

Teori relativitas membawa pengaruh terhadap pengukuran panjang suatu benda yang bergerak terhadap seorang pengamat. Perubahan panjang suatu benda akibat gerakan relatif pengamat atau benda disebut *kontraksi Lorentz* atau *penyusutan panjang* (*length contraction*).

Panjang atau jarak bukanlah sesuatu yang mutlak, tetapi sesuatu yang relatif. Pada dasarnya untuk mengukur jarak, Anda harus melihat kedudukan dua titik secara serentak. Hubungan jarak antara dua kerangka acuan dapat digambarkan dengan cara sederhana seperti berikut ini.

Sebuah sumber cahaya A pada kerangka acuan *S'* bergerak dengan kecepatan v' terhadap kerangka acuan *S*. Suatu kelip cahaya dipancarkan dari sumber tersebut dan dipantulkan oleh sebuah cermin B yang berjarak ℓ_0 dari sumber A. Sebagai acuan ditempatkan sebuah mistar diam yang digunakan untuk menandai jarak yang ditempuh oleh cahaya pulang balik dari sumber ke cermin dan kembali ke sumber. Waktu $\Delta t'$ yang diperlukan untuk pulang pergi cahaya tersebut adalah sebagai berikut.

$$\Delta t' = \frac{2\ell_0}{c} \qquad (9\text{–}25)$$

Andaikan panjang mistar yang diamati dari kerangka *S* adalah ℓ dan waktu yang diperlukan oleh kelip cahaya bergerak dari sumber ke cermin adalah $\Delta t'$ maka panjang lintasan total dari sumber ke cermin bukan ℓ, melainkan adalah

$$d = \ell + v\,\Delta t_1 \qquad (9\text{–}26)$$

Oleh karena kelip cahaya bergerak dengan kecepatan c, maka

$$d = c\,\Delta t_1 \qquad (9\text{–}27)$$

Jika kedua **Persamaan (9–26)** dan **Persamaan (9–27)** digabung, diperoleh

$$c\,\Delta t_1 = \ell + v\,\Delta t_1$$

sehingga

$$\Delta t_1 = \frac{\ell}{c - v} \qquad (9\text{–}28)$$

Untuk kembali ke sumber, jarak yang ditempuh cahaya lebih pendek karena dilihat dari kerangka S, sumber dan cermin saling mendekati. Jika waktu yang diperlukan oleh cahaya untuk kembali adalah Δt_2 maka

$$d = \ell - v\,\Delta t_2 \qquad (9\text{–}29)$$

dan

$$d = c\,\Delta t_2 \qquad (9\text{–}30)$$

dengan cara yang sama diperoleh

$$\Delta t_2 = \frac{\ell}{c + v} \qquad (9\text{–}31)$$

Waktu total $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ untuk perjalanan pulang pergi kelip cahaya dilihat dari S adalah

$$\Delta t = \frac{\ell}{c - v} + \frac{\ell}{c + v}$$

$$\Delta t = \frac{2\ell}{c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \qquad (9\text{–}32)$$

Sampai pada tahap ini, Anda harus mengingat kembali pembahasan tentang transformasi Lorentz, yaitu suatu konstanta diperlukan untuk menyetarakan pengamatan pada kerangka acuan s dan kerangka acuan s'.

$$\Delta t \approx \Delta t'$$
$$\Delta t \approx \gamma\,\Delta t'$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

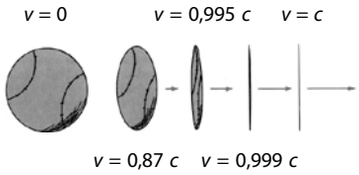
Oleh karena $\Delta t' = \frac{2\ell_0}{c}$, akan didapatkan

$$\frac{2\ell}{c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} = \frac{2\ell/c}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\ell_0 = \frac{\ell}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad (9\text{–}33)$$

atau

$$\ell = \ell_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \qquad (9\text{–}34)$$

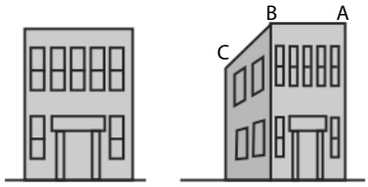


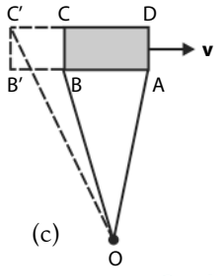
Gambar 9.9
Semakin besar kecepatan bola, ukuran bola akan semakin mengecil.



Tantangan untuk Anda

Perhatikan kembali P**ersamaan (9–26)** dan **Persamaan (9–29)**. **Diskusikan** dengan teman sekelas Anda tentang pengertian fisis persamaan-persamaan tersebut. Kemudian, carilah analogi tentang kejadian pada persamaan tersebut dalam kehidupan sehari-hari.





Gambar 9.10
(a) Sebuah bangunan yang dilihat oleh pengamat yang diam;
(b) Bangunan yang dilihat oleh pengamat yang bergerak sangat cepat;
(c) Diagram yang memperlihatkan bagaimana bagian sisi dinding dapat terlihat.

Persamaan (9–34) menyatakan bahwa benda yang panjangnya ℓ_0 jika diamati oleh pengamat yang bergerak sejajar panjangnya dengan kecepatan v, benda akan terlihat mengalami perubahan panjang. Panjang yang terlihat oleh pengamat yang bergerak adalah

$$\ell = \ell_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \quad \text{karena} \quad \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} < 1 \quad \text{maka} \quad \ell < \ell_0.$$

Keterangan:
ℓ = panjang benda bergerak yang diamati oleh kerangka yang diam
ℓ_0 = panjang benda yang diam pada suatu kerangka acuan
v = kecepatan benda terhadap kerangka diam
c = kecepatan cahaya (3×10^8 m/s)

Jadi, panjang benda seolah-olah menyusut. Gejala ini disebut kontraksi panjang. Hal ini dikemukakan oleh **Lorentz** sehingga kontraksinya disebut *kontraksi Lorentz*.

Contoh 9.3

Sebuah benda dalam keadaan diam panjangnya 10 meter. Benda itu bergerak dengan kecepatan 0,8 c searah dengan panjangnya. Hitunglah panjang benda saat bergerak.

Jawab:
Diketahui: $\ell_0 = 10$ meter, $v = 0{,}8\,c$
Dengan menggunakan **Persamaan (9–34)**: $\ell = \ell_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$

$$\ell = 10\sqrt{1-\frac{(0{,}8\,c)^2}{c^2}} = 10\sqrt{0{,}36} = (10)(0{,}6) = 6 \text{ meter}.$$

Jadi, panjang benda saat bergerak adalah 6 meter.

Contoh 9.4

Sebuah batang terikat pada sebuah roket yang sedang meluncur dengan kelajuan $\frac{1}{2}\sqrt{3}\,c$.

Menurut awak pesawat, panjang batang adalah 2 meter. Berapakah panjang batang tersebut menurut pengamat yang diam terhadap Bumi?

Jawab:
Diketahui: $\ell_0 = 2$ m, $v = \frac{1}{2}\sqrt{3}\,c$

$$\ell = \ell_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow \ell = 2\sqrt{1-\frac{0{,}75c^2}{c^2}} = (2)\left(\frac{1}{2}\right) = 1 \text{ meter}.$$

Jadi, panjang batang menurut pengamat yang diam terhadap Bumi adalah 1 meter. Hal ini berarti bahwa panjang batang itu lebih pendek jika dipandang dari Bumi.

b. Dilatasi Waktu

Einstein menyatakan bahwa waktu adalah sesuatu yang relatif. Hal ini dapat diilustrasikan dengan gerak cahaya di dalam suatu kerangka acuan yang bergerak. Kemudian, gerak cahaya tersebut diamati dari kerangka acuan yang diam seperti pada **Gambar 9.11**.

Kerangka acuan S' bergerak dengan kecepatan relatif terhadap kerangka S. Seorang pengamat pada kerangka S' mengarahkan sebuah sumber cahaya ke sebuah cermin yang jaraknya terlihat seperti **Gambar 9.11(a)**.

Pada gambar terlihat bahwa cahaya yang dipancarkan di O' dipantulkan kembali sepanjang garis yang sama seperti yang diamati dalam kerangka S'. Waktu pulang pergi kelip cahaya di S' dari O ke cermin dan kembali ke O' adalah

$$\Delta t_0 = \frac{2d}{c} \quad \text{atau} \quad d = \frac{c\Delta t_0}{2} \tag{9–35}$$

Kejadian di S' jika dipandang oleh pengamat yang berada pada kerangka S dapat dilihat pada **Gambar 9.11 (b)** yang memperlihatkan bahwa lintasan cahaya waktu pergi tidaklah sama dengan waktu pulang. Jika selang waktu pulang-pergi menurut pengamat di S' adalah Δt, jarak antara O dan O' adalah $v\,\Delta t$. Adapun lintasan cahaya adalah ℓ. Dari gambar terlihat bahwa

$$\Delta t = \frac{2\ell}{c}, \text{ dengan } \ell = \sqrt{d^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2}$$

$$\Delta t = \frac{2}{c}\sqrt{d^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2} \tag{9–36}$$

Jika **Persamaan (9–35)** digabungkan ke dalam **Persamaan (9–36)**, diperoleh

$$\Delta t = \frac{2}{c}\sqrt{\left(\frac{c\Delta t_0}{2}\right) + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2} \tag{9–37}$$

Jika **Persamaan (9–37)** dikuadratkan, diperoleh

$$\Delta t^2 = \frac{21}{c^2}\left[\left(\frac{c\Delta t_0}{2}\right)^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2\right]$$

$$\Delta t^2 = \Delta t_0^{\,2} + \frac{v^2\Delta t^2}{c^2}$$

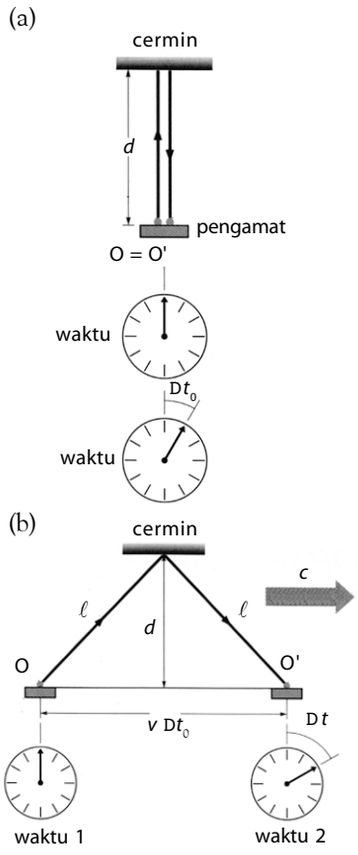
$$\Delta t^2 - \frac{v^2\Delta t^2}{c^2} = \Delta t_0^{\,2}$$

$$\Delta t^2 - \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = \Delta t_0^{\,2}$$

Selanjutnya, diperoleh hubungan antara Δt dan Δt_0 yang dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tag{9–38}$$

Keterangan:
v = kecepatan relatif pengamat yang bergerak terhadap pengamat yang diam
Δt = selang waktu diukur oleh pengamat yang relatif bergerak
Δt_0 = selang waktu diukur oleh pengamat yang relatif diam



Gambar 9.11
(a) Kelip cahaya pulang balik dipancarkan di O dipandang oleh pengamat di S'; (b) Kelip cahaya di S' dipandang dari S.

Contoh 9.5

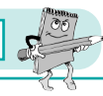
Suatu partikel memiliki waktu hidup 2×10^{-6} sekon, yaitu waktu partikel itu mulai ada hingga musnah sama sekali. Berapakah waktu hidup partikel itu jika ia bergerak dengan kelajuan 0,98 c?

Jawab:

Diketahui: $\Delta t_0 = 2 \times 10^{-6}$ sekon, $v = -0{,}98\,c$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2 \times 10^{-6}}{\sqrt{1 - \frac{(0{,}98\,c)^2}{c^2}}} = 1 \times 10^{-5} \text{ detik.}$$

Mari Mencari Tahu



Salah satu bukti kebenaran teori relativitas adalah fakta keberadaan *muon* di Bumi. Carilah informasi tentang *muon* ini dari berbagai sumber dan buatlah resume dari informasi yang Anda dapatkan. Kumpulkan resume Anda kepada guru. Resume terbaik dipresentasikan dan didiskusikan di depan kelas.

5. Momentum dan Massa Relativistik

Hukum Newton tentang gerak menyatakan bahwa jika pada sebuah benda bermassa m bekerja sebuah gaya konstan F, benda tersebut akan bergerak dipercepat beraturan. Besarnya kecepatan benda akan bertambah terus sesuai waktu berdasarkan hubungan $v = \frac{F}{m} t$. Jika gaya F bekerja cukup lama sehingga harga t sangat besar, tidaklah mustahil laju benda menjadi sangat besar. Dari hasil percobaan, bagaimana pun besarnya energi yang digunakan, besarnya kecepatan sebuah benda tidak pernah mencapai kecepatan cahaya. Setiap benda yang bermassa m bergerak dengan kecepatan v memiliki momentum linear yang menurut mekanika klasik dirumuskan

$$p = m\,v \qquad (9\text{–}39)$$

Jika kecepatan benda v suatu saat mendekati kecepatan cahaya, massa benda akan berubah-ubah. Pada saat itu momentum benda disebut momentum relativistik.

Untuk gerakan-gerakan benda dengan kecepatan yang relatif kecil, tidak terjadi perubahan massa. Perubahan itu, baru tampak jika kecepatannya mendekati kecepatan cahaya. Oleh *Einstein*, hubungan massa diam dan massa bergerak yang ditinjau dari suatu pengamat dirumuskan sebagai berikut.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad (9\text{–}40)$$

Keterangan:

m = massa benda dalam keadaan bergerak (kg)
m_0 = massa benda dalam keadaan diam (kg)
v = kecepatan benda (m/s)
c = kecepatan cahaya di udara (m/s)

Jika **Persamaan (9–40)** disubstitusikan ke dalam **Persamaan (9–39)** maka

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad (9–41)$$

Hukum Kekekalan Momentum berlaku dalam relativitas khusus, seperti dalam fisika klasik. Namun, Hukum II Newton mengenai gerak dalam teori relativitas dapat dituliskan sebagai berikut.

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}\right) \qquad (9–42)$$

Pada persamaan $\frac{d}{dt}(mv) = m\frac{dv}{dt} + v\frac{dm}{dt}$, harga $\frac{dm}{dt}$ tidak nol jika massa benda berubah terhadap waktu. Gaya resultan pada benda selalu sama dengan laju perubahan momentum terhadap waktu.

Contoh 9.6

Jika massa diam benda 5 kg, hitunglah massa benda bergerak dengan kecepatan $\frac{12}{13}$c.

Jawab:

Dengan menggunakan **Persamaan (9–40)** diperoleh

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{5}{\sqrt{1 - \frac{\left(\frac{12}{13}c\right)^2}{c^2}}} = \frac{5}{\frac{5}{13}} = 13 \text{ kg}$$

Ada hal menarik yang berkaitan dengan massa relativistik ini. Apakah Anda percaya ada partikel yang tidak memiliki massa tetapi memiliki energi? Menurut fisika klasik, hal ini tidak mungkin terjadi, jika $m = 0$.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(0)\,v^2 = 0$$

Akan tetapi, jika hal ini ditinjau menurut teori relativitas, dapat dibuktikan secara matematis bahwa ada partikel yang tidak bermassa, tetapi memiliki energi. Misalkan, ada sebuah partikel yang bermassa $m = 0$ dan bergerak dengan kecepatan $v = c$.

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{0}{0}$$

$$P = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$P = \frac{0}{0}$$

Dalam matematika, $\frac{0}{0}$ adalah bentuk tidak tentu sehingga nilainya sembarang (berapa saja). Kesimpulannya adalah ada partikel yang tidak bermassa (massa diam), tetapi memiliki energi. Dalam kehidupan sehari-hari, partikel yang memiliki karakteristik seperti tersebut, adalah foton dan neutrino.

6. Kesetaraan Massa dan Energi

Hubungan paling terkenal yang diperoleh Einstein dari postulat relativitas khusus adalah mengenai massa dan energi. Hubungannya dapat diturunkan secara langsung dari definisi energi kinetik (E_k) dari suatu benda yang bergerak.

$$E_k = \int_0^s F\, ds$$

dengan F menyatakan komponen gaya yang bekerja dalam arah perpindahan, serta ds dan s menyatakan jarak yang ditempuh. Dengan memakai bentuk relativistik hukum gerak kedua diperoleh

$$F = \frac{d(mv)}{dt}$$

sehingga rumusan energi kinetik menjadi

$$E_k = \int_0^s \frac{d(mv)}{dt} ds$$

$$E_k = \int_0^{mv} v\, d(mv) = \int_0^v v\, d\left(\frac{m_0 v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right)$$

Dengan menggunakan rumusan integral parsial akan diperoleh

$$E_k = m\,c^2 - m_0\,c^2 \qquad (9\text{–}43)$$

Hasil ini menyatakan bahwa energi kinetik suatu benda sama dengan pertambahan massanya (akibat gerak relatifnya) dikalikan dengan kuadrat kelajuan cahaya. Persamaan dapat juga ditulis

$$m\,c^2 = E_k - m_0\,c^2 \qquad (9\text{–}44)$$

Jika dimisalkan mc^2 sebagai energi total benda, benda dalam keadaan diam ($E_k = 0$), tetapi benda tetap memiliki energi m_0c^2. Dengan demikian, m_0c^2 disebut energi diam (E_0) dari benda yang massa diamnya m_0, **Persamaan (9–44)** menjadi

$$E = E_0 + E_k \qquad (9\text{–}45)$$

Keterangan:
E_0 = energi diam (joule)
Jika benda bergerak, energi totalnya adalah

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad (9\text{–}46)$$



Tantangan untuk Anda

Dapatkah Anda **menduga**, apakah ada partikel yang bergerak dengan kecepatan 0,95 *c* dan memiliki energi sebesar *E* tetapi tidak memiliki massa?

Oleh karena massa dan energi bukan merupakan kuantitas yang bebas, Hukum Kekekalan Massa dan Energi sebenarnya menjadi satu, yaitu Hukum Kekekalan Massa-Energi. Massa dapat terciptakan dan termusnahkan, tetapi jika hal ini terjadi sejumlah energi yang setara hilang atau muncul dan sebaliknya. Jadi, massa dan energi merupakan aspek yang berbeda dari suatu kuantitas.

Ingatlah

Perumusan integral parsial adalah:

$\int x\,dy = xy - \int y\,dx$

Contoh 9.7

Berapakah energi total, energi kinetik, dan momentum sebuah proton ($m_0c^2 = 938$ MeV) yang bergerak dengan kecepatan $v = 0{,}6\,c$?

Jawab:

Energi total dapat dihitung dengan menggunakan **Persamaan (9–46)**

a. $$E = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{938\text{ MeV}}{\sqrt{1-\frac{(0{,}6c)^2}{c^2}}} = \frac{938}{\sqrt{0{,}64}} = 1172{,}5\text{ MeV}$$

$$E_{tot} = (1172{,}5 \times 10^6\text{ eV})\,(1{,}602 \times 10^{-19}\text{ joule/eV})$$
$$= 1{,}878 \times 10^{-10}\text{ joule}$$

b. Energi kinetiknya: $E_k = E - m_0c^2$

$Ek = (1172{,}5 - 938)\text{ MeV} = 234{,}5\text{MeV}.$

c. Momentumnya

$$m_0 = \frac{938\text{ MeV}}{c^2} = \frac{(938\times10^6)(1{,}6\times10^{-19}\text{ joule/MeV})}{(3\times10^8)^2\text{ m/s}}$$
$$= 1{,}73 \times 10^{-27}\text{kg}$$

sehingga $p = \dfrac{m_0v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

$$p = \frac{(1{,}73\times10^{-27}\text{ kg})(0{,}6)(3\times10^8\text{ m/s})}{\sqrt{1-\frac{(0{,}6c)^2}{c^2}}} = 3{,}89\times10^{-19}\text{ kg m/s}$$

Jadi, momentumnya adalah $3{,}89 \times 10^{-19}$ kg m/s.

Hal yang menarik untuk dibahas mengenai energi relativistik adalah bagaimana menghitung energi relativistik suatu partikel jika massanya tidak diketahui atau jika partikel tersebut tidak bermassa? Perhatikan kembali pembahasan pada subbab sebelumnya mengenai partikel yang tidak bermassa, tetapi memiliki energi. Persamaan energi dan momentum relativistik dapat dituliskan sebagai berikut.

$$E = mc^2$$

$$p = \frac{m_0v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Jika kedua persamaan tersebut dikuadratkan, akan didapatkan

$$E^2 = m^2c^4 \qquad (9\text{–}47)$$

$$p^2 = \frac{m_0^2v^2}{1-\frac{v^2}{c^2}} \qquad (9\text{–}48)$$

Pembahasan Soal

Agar energi kinetik benda bernilai 25% dari energi diamnya dan c adalah kelajuan cahaya ruang hampa, benda harus bergerak dengan kelajuan

a. $\frac{c}{4}$ d. $\frac{3c}{4}$

b. $\frac{c}{2}$ e. $\frac{4c}{5}$

c. $\frac{3c}{5}$

UMPTN 1998

Pembahasan:

Energi kinetik relativitas adalah

$$E_k = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1\right)$$

Dengan menggunakan $E_k = \frac{1}{4}m_0c^2 = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1\right)$

Jadi,

$$\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1\right) = \frac{1}{4}\text{ ; atau}$$

$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{5}{4}$$

$$1-\frac{v^2}{c^2} = \frac{16}{25} \Rightarrow v^2 = \frac{9}{25}c^2$$

$$v = \frac{3}{5}c$$

Jawaban: c

Kalikan **Persamaan (9–48)** dengan c^2, diperoleh

$$p^2c^2 = \frac{m_0{}^2v^2c^2}{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

Kurangkan **Persamaan (9–47)** dengan **Persamaan (9–48)** sehingga

$$E^2 - p^2c^2 = m^2c^4 - \frac{m_0{}^2v^2c^2}{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

Oleh karena $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ maka

$$E^2 - p^2c^2 = \frac{m_0{}^2c^4}{1-\frac{v^2}{c^2}} - \frac{m_0{}^2v^2c^2}{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

$$E^2 - p^2c^2 = \frac{m_0{}^2c^4\left[1-\frac{v^2}{c^2}\right]}{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

$$E^2 - p^2c^2 = m_0{}^2c^4$$

$$\boxed{E^2 = m_0{}^2c^4 + p^2c^2} \qquad (9\text{–}49)$$

Dengan menggunakan **Persamaan (9–49),** Anda dapat menghitung berapa energi relativistik suatu partikel yang tidak bermassa, yaitu

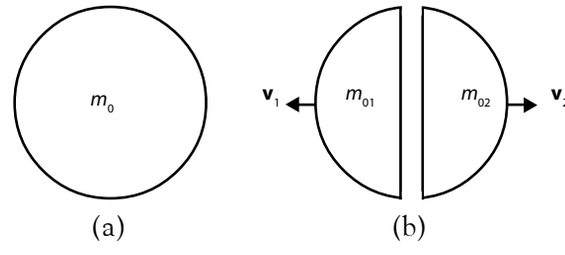
$$E^2 = p^2c^2$$

$$\boxed{E = pc} \qquad (9\text{–}50)$$

7. Hukum Kekekalan Energi dan Momentum Relativistik

Di Kelas XI, Anda telah mempelajari tentang Hukum Kekekalan Energi dan Hukum Kekekalan Momentum. Hukum Kekekalan Energi menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, tetapi energi dapat berubah bentuk menjadi energi lain. Dengan kata lain, pada suatu sistem, energi awalnya sama dengan energi akhirnya. Begitu juga Hukum Kekekalan Momentum, jika pada suatu sistem tidak bekerja gaya luar, momentum awal sama dengan momentum akhir.

Kedua hukum ini berlaku juga pada suatu sistem relativistik. Energi awal relativistik sama dengan energi akhir relativistik, dan momentum awal relativistik sama dengan momentum akhir relativistik. Supaya Anda dapat lebih memahami Hukum Kekekalan Energi dan Momentum Relativistik, perhatikan **Gambar 9.12** berikut.



Gambar 9.12
(a) Sebuah benda yang memiliki massa diam m_0;
(b) Benda tersebut pecah menjadi dua bagian.

Gambar 9.12 menunjukkan sebuah benda yang memiliki massa diam m_0 secara spontan pecah menjadi dua bagian m_{01} dan m_{02}. Kedua pacahan ini bergerak dengan kecepatan yang berbeda, yaitu v_1 dan v_2. Untuk menggambarkan konsep ini dengan lebih jelas, besaran-besaran m_{01}, m_{02}, v_1, dan v_2 akan diberi nilai, yaitu massa $m_{01} = 4$ kg bergerak dengan kecepatan $v_1 = 0{,}8\ c$, dan massa $m_{02} = 6$ kg bergerak dengan kecepatan $v_2 = 0{,}6\ c$. Berdasarkan Hukum Kekekalan Energi, berlaku:

Energi awal = Energi akhir

$$m_0 c^2 = \frac{m_{01}c^2}{\sqrt{1-\frac{v_1^2}{c^2}}} - \frac{m_{02}c^2}{\sqrt{1-\frac{v_2^2}{c^2}}} \qquad (9\text{–}51)$$

Jika **Persamaan (9–51)** dibagi dengan c^2, diperoleh

$$m_0 = \frac{m_{01}}{\sqrt{1-\frac{v_1^2}{c^2}}} - \frac{m_{02}}{\sqrt{1-\frac{v_2^2}{c^2}}} \qquad (9\text{–}52)$$

Jadi, dari **Persamaan (9–52)** Anda dapat mengetahui massa diam dari benda sebelum pecah.

$$m_0 = \frac{4}{\sqrt{1-\frac{(0{,}8c)^2}{c^2}}} + \frac{6}{\sqrt{1-\frac{(0{,}6c)^2}{c^2}}}$$

$$m_0 = \frac{4}{0{,}6} + \frac{4}{0{,}8} = 14{,}2 \text{ kg}$$

Dari hasil perhitungan tersebut, apakah Anda menemukan sesuatu yang menarik? Hasil perhitungan menunjukkan massa diam pada keadaan awal ($m_0 = 14{,}2$ kg) berbeda dengan massa diam pada keadaan akhir (10 kg). Hal ini sejalan dengan implikasi teori relativitas khusus yang menyebabkan pemuaian massa pada benda yang bergerak mendekati kecepatan cahaya.

Kemudian, bagaimana dengan momentumnya? Selama tidak ada pengaruh gaya luar, akan berlaku Hukum Kekekalan Momentum.

Momentum awal = momentum akhir

$$\frac{m_0 v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_{01}v_1^2}{\sqrt{1-\frac{v_1^2}{c^2}}} + \frac{m_{02}v_2^2}{\sqrt{1-\frac{v_2^2}{c^2}}} \qquad (9\text{–}53)$$

8. Aplikasi Kesetaraan Massa dan Energi pada Reaksi Fisi dan Fusi Nuklir

Apa yang dapat Anda simpulkan dari pembahasan tentang Hukum Kekekalan Energi dan Momentum Relativistik? Kesimpulan dari Hukum Kekekalan Energi Relativistik adalah massa diam tidak kekal.

$m_{01} = 14{,}2$ kg

$m_{02} = 10$ kg

$\Delta m = m_{01} - m_{02} = 14{,}2 - 10$ kg $= 4{,}2$ kg

Pengurangan massa ini ekivalen dengan energi,

$$\Delta m\, c^2 = 4{,}2\ c^2$$

Ingatlah

Menurut **Planck**, energi pada foton adalah $E = hf$. Jadi, $hf = pc$

$P = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$

Kemudian, bagaimana dengan energi kinetiknya? Energi kinetik pada keadaan awal dan keadaan akhir dapat dituliskan sebagai berikut.

E_k awal $= 0$

E_k akhir $= E_{k1} + E_{k2}$

$$E_{k1} = \frac{m_{01}c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - m_{01}c^2 = m_{01}c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1\right)$$

$$= 4\,c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{(0{,}8c)^2}{c^2}}} - 1\right) = 2{,}7\,c^2$$

$$E_{k1} = m_{02}c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1\right) = 6\,c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{(0{,}6c)^2}{c^2}}} - 1\right) = 1{,}5\,c^2$$

Jadi, E_k akhir $= 2{,}7\,c^2 + 1{,}5\,c^2 = 4{,}2\,c^2$ sehingga

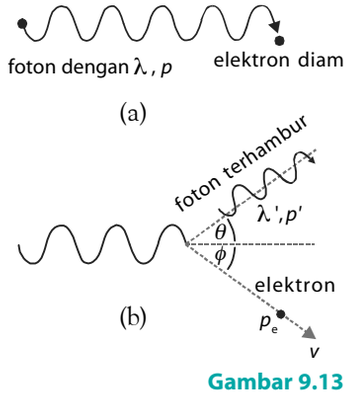
$\Delta E_k = E_k$ akhir $- E_k$ awal

$= 4{,}2\,c^2$

Apa yang dapat Anda simpulkan dari perhitungan selisih massa diam dan selisih energi kinetik tersebut? Ternyata, selisih energi kinetik yang dihasilkan sama dengan energi diam akibat selisih massa diam tersebut. Ini berarti, ada konversi energi diam akibat pengurangan massa diam menjadi energi kinetik yang dibebaskan, atau pengurangan energi kinetik akan mengakibatkan penambahan massa diam. Secara matematis, hal ini dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\Delta E_k = \Delta m c^2 \qquad (9\text{–}54)$$

Konsep kesetaraan massa dan energi ini terjadi pada reaksi fisi dan fusi akhir. Pada reaksi fisi nuklir, sebuah inti berat ditumbuk oleh sebuah partikel sehingga membelah menjadi dua buah inti. Kedua inti ini memiliki massa diam lebih ringan dari massa diam inti induknya karena sebagian massa diamnya berubah menjadi energi kinetik. Adapun pada reaksi fusi nuklir, dua buah inti ringan bergabung membentuk sebuah inti yang lebih berat. Massa diam dua inti pembentuknya lebih berat daripada massa inti hasil penggabungan karena sebagian massanya berubah menjadi energi kinetik.



Gambar 9.13
Tumbukan foton dan elektron (a) sebelum tumbukan; (b) sesudah tumbukan.

9. Penerapan Prinsip Relativitas dalam Efek Compton

Pada Bab 7 Anda telah belajar tentang cahaya yang dianggap sebagai partikel, yaitu cahaya merupakan penyebaran paket-paket energi yang disebut foton. Salah satu hal yang mendukung konsep ini adalah efek Compton. Ketika sebuah foton menumbuk sebuah elektron diam, maka foton tersebut akan terhambur dengan membentuk sudut tertentu. Untuk mengingatkan Anda tentang efek Compton, perhatikan **Gambar 9.13** berikut.

Gambar 9.13 menunjukkan sebuah foton dengan panjang gelombang λ menumbuk sebuah elektron diam dengan massa m_0 Akibat tumbukan tersebut, foton terhambur dengan sudut θ terhadap horizontal. Setelah tumbukan, panjang gelombang foton berubah. Untuk mengetahui panjang

gelombang foton sesudah tumbukan atau sudut hamburan fotonnya dapat diketahui dari Hukum Kekekalan Momentum pada peristiwa tumbukan tersebut.

Momentum awal = Momentum akhir

Pada sumbu-x didapatkan

$$\frac{hf}{c} + 0 = \frac{hf'}{c}\cos\theta + p\cos\phi \qquad (9\text{–}55)$$

Pada sumbu-y didapatkan

$$0 = \frac{hf'}{c}\sin\theta + p\sin\phi$$

$$\frac{hf'}{c}\sin\theta = p\sin\phi \qquad (9\text{–}56)$$

Kalikan **Persamaan (9–55)** dan **(9–56)** dengan c sehingga diperoleh

$$hf - hf'\cos\theta = pc\cos\phi \qquad (9\text{–}57)$$

$$hf'\sin\theta = pc\sin\phi \qquad (9\text{–}58)$$

Ingatlah

$\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$

Kuadratkan **Persamaan (9–57)** dan **(9–58)** sehingga diperoleh

$$(hf)^2 + (hf')^2\cos^2\theta - 2(hf)(hf')\cos\theta = p^2c^2\cos\phi \qquad (9\text{–}59)$$

$$(hf')^2\sin^2\theta = p^2c^2\sin^2\phi \qquad (9\text{–}60)$$

Eliminasikan **Persamaan (9–59)** dan **(9–60)** sehingga didapatkan

$(hf)^2 + (hf')^2(\cos^2\theta + \sin^2\theta) - 2(hf)(hf')\cos\theta = p^2c^2(\cos\phi\sin^2\phi)$

$(hf)^2 + (hf')^2 - 2(hf) + (hf')\cos\theta = p^2c^2$

Pada subbab mengenai kesetaraan massa dan energi, Anda telah belajar bahwa

$$E = Ek + m_0c^2$$

dan

$$E^2 = m_0^2c^4 + p^2c^2 \qquad (9\text{–}61)$$

Dari kedua persamaan tentang energi relativitas tersebut didapatkan

$$(E_k + m_0c^2) = m_0^2c^4 + p^2c^2$$

$$E_k + 2E_k m_0c^2 + m_0^2c^4 = m_0^2c^4 + p^2c^2$$

$$p^2c^2 = E_k^2 + 2E_k m_0c^2 \qquad (9\text{–}62)$$

Seperti telah dibahas sebelumnya, elektron pada mulanya diam, setelah ditumbuk oleh foton, elektron bergerak dengan energi kinetik tertentu. Dengan kata lain, sebagian energi foton telah berubah menjadi energi kinetik elektron.

$$E_k = hf - hf'$$

Maka, **Persamaan (9–62)** dapat dituliskan menjadi

$$p^2c^2 = (hf)^2 - 2(hf)(hf')^2 - (hf')^2 + 2m_0c^2(hf - hf') \qquad (9\text{–}63)$$

Substitusikan **Persamaan (9–63)** ke **Persamaan (9–61)**

$(hf)^2 + (hf')^2 - 2(hf)(hf') + 2m_0c^2(hf - hf')^2 = (hf')^2 + (hf')^2 - 2(hf)(hf')$

Kata Kunci

- relativitas khusus
- transformasi Lorentz
- kontraksi Lorentz
- dilatasi Lorentz
- dilatasi waktu
- momentum relativitas
- massa diam
- kesetaraan massa dan energi
- reaksi fusi
- reaksi fisi

$$\cos\theta \; 2\, m_0c^2\, (hf - hf')^2 = 2(hf)(hf')(1-\cos\theta) \qquad (9\text{–}64)$$

Bagi **Persamaan (9–64)** dengan $2\, h^2c^2$ sehingga diperoleh

$$\frac{m_0}{h}(f - f') = \frac{f\,f'}{c^2}(1-\cos\theta)$$

Oleh karena $f = \frac{c}{\lambda}$, maka $\lambda\,\lambda'\left(\frac{1}{\lambda'} - \frac{1}{\lambda'}\right) = \frac{h}{m_0c}(1-\cos\theta)$

atau

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda' = \frac{h}{m_0c}(1-\cos\theta) \qquad (9\text{–}65)$$

Jadi, peristiwa efek Compton merupakan salah satu bukti tentang konsep dualisme gelombang partikel dan teori relativitas khusus.

Tes Kompetensi Subbab B

Kerjakanlah pada buku latihan.

1. Dua pesawat, alfa dan beta bergerak dengan arah berlawanan. Kelajuan pesawat alfa sebesar 0,5 c dan kelajuan pesawat beta adalah 0,4 c. Tentukanlah kelajuan pesawat alfa relatif terhadap pesawat beta.
2. Sebuah pesawat ruang angkasa bergerak menjauhi Bumi dengan kecepatan 0,6 c. Pesawat tersebut menembakkan sebuah peluru yang arahnya sama dengan geraknya. Jika kecepatan peluru 0,9 c relatif terhadap pesawat itu, tentukanlah kecepatan relatif peluru itu terhadap Bumi.
3. Seorang pengamat di Bulan melihat dua pesawat angkasa luar A dan B mendekati Bulan dalam arah yang berlawanan masing-masing dengan kelajuan 0,8 c dan 0,9 c.
 a. Berapakah kelajuan Bulan mendekati pesawat A menurut pengamat dalam pesawat A?
 b. Berapakah kelajuan B terhadap A menurut pengamat dalam pesawat A?
 c. Berapakah kelajuan Bulan mendekati pesawat B menurut pengamat dalam pesawat B?
 d. Berapakah kelajuan A terhadap B menurut pengamat dalam pesawat B?
4. Berapa kecepatan roket pada saat panjangnya memendek 20%?
5. Sebuah pesawat antariksa melewati Bumi dengan kelajuan $v = 0{,}8\,c$. Sebuah tongkat yang panjangnya 2 m diukur di Bumi berada dalam pesawat dengan posisi sejajar dengan arah gerak pesawat. Tentukan panjang tongkat
 a. menurut penumpang dalam pesawat;
 b. menurut pengamat yang diam di Bumi.
6. Sebuah pesawat terbang bergerak dengan kecepatan 750 m/s. Setelah berapa harikah menurut jam di Bumi, kedua jam (di Bumi dan di pesawat) berbeda 10^{-6} sekon? Gunakan pendekatan $(1-x)^n = (1-nx)$.
7. Dua orang kembar A dan B berumur 25 tahun di Bumi. A berangkat ke bintang Alfa Centauri yang jauhnya 4 kali tahun cahaya (1 tahun cahaya = jarak yang ditempuh cahaya selama 1 tahun) dengan kecepatan 0,8 c. Setelah itu, A kembali ke Bumi. Berapakah umur kedua orang itu setelah mereka bertemu?
8. Suatu elektron dipercepat dengan beda potensial 1,5 MeV. Berapakah kecepatan yang diperolehnya? (muatan elektron $q_e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ coulomb dan massa elektron $m_e = 9{,}1 \times 10^{-31}$ kg)

Rangkuman

1. Prinsip relativitas Galileo berdasarkan dua postulat sebagai berikut.
 a. Waktu adalah besaran mutlak;
 b. hukum gerak Newton tidak berubah bentuk (invarian).
2. Prinsip relativitas Einstein berdasarkan dua postulat berikut:
 a. kelajuan di dalam ruang hampa adalah suatu besaran mutlak;
 b. hukum mekanika Newton dan elektromagnetik Maxwell invarian dalam berbagai kerangka inersial.
3. Percobaan Michelson-Morley membuktikan bahwa:
 a. eter tidak ada;
 b. kecepatan cahaya tidak bergantung pada arah dan tempat.
4. Transformasi kecepatan relatif khusus menurut mekanika relativistik dirumuskan sebagai berikut.

 $$v_x = \frac{v_x' + v}{1 + \frac{v\,v_x'}{c}} \quad \text{atau} \quad v'_x = \frac{v_x - v}{1 - \frac{v_x v}{c^2}}$$

5. Transformasi Lorentz dirumuskan dengan

 $$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}};\; y' = y;\; z' = z;\; t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}\left(t\frac{v_x}{c^2}\right)$$

6. Kontraksi Lorentz dirumuskan dengan

$$\ell = \ell_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

7. Dilatasi waktu dirumuskan dengan

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \text{ dimana } \Delta t > \Delta t_0$$

8. Massa relativistik dirumuskan dengan

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

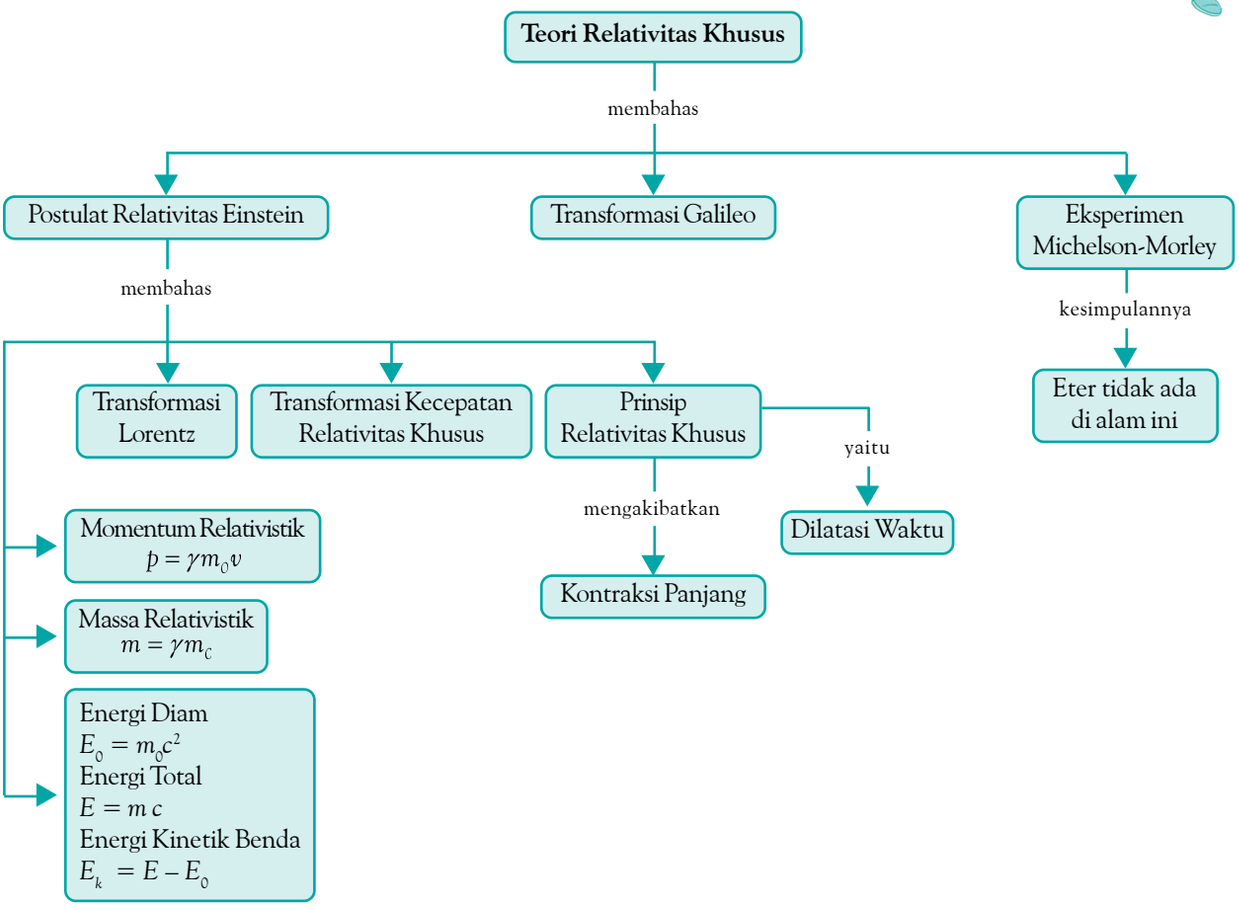
9. Momentum dan massa relativistik dirumuskan dengan

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

10. Energi kinetik dirumuskan dengan

$$E_k = mc^2 - m_0c = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - m_0c^2$$

Peta Konsep



Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, tentu Anda telah memahami bahwa gerak bersifat relatif. Anda juga tentu telah memahami teori relativitas Einstein dan pengaruhnya terhadap besaran panjang, waktu, kecepatan dan massa benda. Dari keseluruhan materi yang ada pada bab ini, bagian manakah yang menurut Anda sulit dipahami? Coba Anda diskusikan bersama teman atau guru Fisika Anda.

Selain Anda mengetahui teori relativitas khusus, coba Anda cari manfaat lain mempelajari materi bab ini. Kemudian, diskusikan hasilnya bersama teman Anda.

Tes Kompetensi Bab 9

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling benar.

1. Dari besaran-besaran berikut ini, yang harganya selalu sama untuk semua kerangka acuan pengamatan adalah
 a. kecepatan benda
 b. kelajuan benda
 c. kecepatan cahaya
 d. panjang benda
 e. massa benda
2. Salah satu postulat Einstein dalam teori relativitas adalah
 a. hukum-hukum Newton tetap berlaku untuk benda yang memiliki kecepatan mendekati kecepatan cahaya
 b. kecepatan benda dapat lebih besar dari kecepatan cahaya
 c. kecepatan benda besarnya mutlak, tidak bergantung pada pengamatnya
 d. kecepatan cahaya besarnya mutlak, tidak bergantung pada pengamatnya
 e. kecepatan benda menentukan besarnya massa benda
3. Jika laju partikel 0,6 c, perbandingan relativistik terhadap massa diamnya adalah....
 a. 5 : 3 d. 25 : 5
 b. 25 : 9 e. 8 : 5
 c. 5 : 4
4. Kecepatan pesawat A = 30 m/s, dan kecepatan pesawat B = 20 m/s. A bergerak searah dengan B. Kecepatan A terhadap kecepatan B menurut Newton dan menurut Einstein adalah ... m/s.
 a. 10 dan 10 d. 8 dan 8
 b. 10 dan 12 e. 12 dan 12
 c. 8 dan 10
5. Dua pesawat A dan B berpapasan, masing-masing dengan kecepatan $\frac{1}{2}c$ (c = kecepatan cahaya). Kecepatan pesawat A terhadap pesawat B adalah
 a. 0,6 c d. 1,2 c
 b. 0,8 c e. 1,4 c
 c. 1,0 c
6. Sebuah roket ketika diam di Bumi memiliki panjang 100 m. Kemudian, roket tersebut bergerak dengan kecepatan 0,8 c (c = kecepatan cahaya dalam ruang hampa). Menurut orang di Bumi, panjang roket tersebut selama bergerak adalah
 a. 50 m
 b. 60 m
 c. 70 m
 d. 80 m
 e. 100 m
7. Pesawat bergerak dengan kecepatan 0,6 c terhadap Bumi. Orang di Bumi melihat nyala lampu selama 8 sekon dari pesawat itu. Nyala lampu menurut orang yang berada di dalam pesawat adalah
 a. 6 s d. 8 s
 b. 6,4 s e. 10 s
 c. 7 s
8. Sebuah roket yang memiliki panjang 80 meter dan massa 4 ton bergerak dengan kecepatan 0,8 c. Menurut pengamat di Bumi
 a. massa roket > 4 ton, panjang roket > 80 m
 b. massa roket > 4 ton, panjang roket < 80 m
 c. massa roket = 4 ton, panjang roket < 80 m
 d. massa roket < 4 ton, panjang roket < 80 m
 e. massa roket = 4 ton, panjang roket = 80 m
9. Sebuah elektron yang memiliki massa diam m_0 bergerak dengan kecepatan 0,6 c, maka energi kinetiknya adalah
 a. $0{,}25\, m_0c^2$
 b. $0{,}36\, m_0c^2$
 c. m_0c^2
 d. $1{,}80\, m_0c^2$
 e. $2{,}80\, m_0c^2$
10. Sebuah tongkat yang panjangnya 5 m, membentuk sudut sebesar $\alpha \left(\tan\alpha = \frac{4}{3}\right)$ terhadap arah timur. Jika tongkat bergerak ke timur dengan kecepatan $\frac{1}{2}\sqrt{3}c$, panjang tongkat saat bergerak adalah
 a. 5,6 m d. 3,7 m
 b. 5,0 m e. 3,0 m
 c. 4,3 m
11. Pada ulang tahun dua orang kembar (A dan B) yang ke-30, A mengembara ke angkasa luar dengan pesawat yang berkecepatan $\frac{1}{2}\sqrt{3}c$, sedangkan B tetap di Bumi. Menurut kalender di Bumi, A kembali setelah 5 tahun sehingga umur masing-masing pada saat itu menurut A adalah ... tahun.
 a. A dan $B = 32{,}5$
 b. A dan $B = 35$
 c. $A = 32{,}5$ dan $B = 35$
 d. $A = 35$ dan $B = 40$
 e. A dan $B = 40$
12. Sebuah persegi panjang dengan sisi 10 meter dan 6 meter bergerak searah panjangnya dengan kecepatan 0,6 c. Luas bidang tersebut adalah
 a. 70 m^2 d. 48 m^2
 b. 62 m^2 e. 40 m^2
 c. 60 m^2

13. Sebuah benda dalam keadaan diam panjangnya x_0. Kemudian, digerakkan dengan kecepatan v (mendekati kecepatan cahaya) sehingga panjang benda menurut pengamat diam yang berada sejajar arah panjang benda adalah

a. $x = x_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$

b. $x = x_0\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}$

c. $x = x_0\sqrt{1-\frac{v^2}{2c^2}}$

d. $x = x_0\sqrt{1+\frac{c^2}{v^2}}$

e. $x = x_0\sqrt{1-\frac{c^2}{v^2}}$

14. Jika massa diam sebuah partikel m dan massa itu bergerak dengan kelajuan 0,8 c, perbandingan massa diam terhadap masa bergeraknya adalah
a. 4 : 5
b. 3 : 5
c. 5 : 6
d. 5 : 4
e. 5 : 3

15. Jarak dua puncak gunung adalah 10 km. Jika diamati oleh orang yang berada dalam pesawat yang melintas di atas kedua puncak itu dengan kecepatan 0,6 kali kecepatan cahaya, jarak kedua gunung itu adalah
a. 6 km
b. 7 km
c. 8 km
d. 9 km
e. 10 km

16. Ada dua orang kembar, A dan B. Kemudian, B naik pesawat *Enterprise* dengan kelajuan 0,8c. A dan B kemudian bertemu pada suatu acara keluarga. Menurut B mereka telah berpisah selama 12 tahun, sementara A tidak percaya. Lama perjalanan tersebut menurut A adalah ... tahun.
a. 8
b. 10
c. 12
d. 15
e. 20

17. Menurut Einstein, sebuah benda dengan massa diam m_0 setara dengan energi m_0c^2, dengan c adalah kecepatan rambat cahaya di dalam ruang hampa. Jika benda bergerak dengan kecepatan v, energi total benda setara dengan

(1) $\frac{1}{2}m_0c$

(2) $\frac{1}{2}m_0\left(2c^2+v^2\right)$

(3) $m_0\left(c^2+v^2\right)$

(4) $\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

Pernyataan yang benar adalah
a. (1), (2), dan (3)
b. (1) dan (3)
c. (2) dan (4)
d. hanya (4)
e. semuanya benar

18. Pernyataan yang benar menurut teori relativitas Einstein adalah
a. massa benda diam lebih kecil daripada massa benda bergerak
b. panjang benda diam lebih panjang daripada panjang benda bergerak
c. gerak pengamat dan gerak sumbunya tidak memengaruhi cepat rambat cahaya
d. selang waktu dua keadaan yang diamati pengamat bergerak lebih besar dari pengamat diam
e. waktu merupakan besaran yang bersifat mutlak

19. Sebuah pesawat memiliki panjang L. Ketika pesawat tersebut bergerak dengan kecepatan v, panjang pesawat menjadi $\frac{3}{4}L$. Besar v adalah

a. $\frac{1}{4}\sqrt{5c}$
b. $\frac{1}{4}\sqrt{7c}$
c. $\frac{1}{3}\sqrt{5c}$
d. $\frac{1}{3}\sqrt{7c}$
e. $\frac{1}{2}\sqrt{3c}$

20. Agar energi kinetik benda bernilai 25% energi diamnya dan c adalah kelauan cahaya dalam ruang hampa, maka benda lurus bergerak dengan kelajuan

a. $\frac{c}{4}$
b. $\frac{c}{2}$
c. $\frac{3c}{5}$
d. $\frac{3c}{4}$
e. $\frac{4c}{5}$

21. Sebuah pesawat ultramodern bergerak mendekati Bumi dengan kecepatan 0,25 c dan memancarkan gelombang radio. Menurut orang di Bumi, kecepatan gelombang radio tersebut adalah....

a. $\frac{1}{4}c$
b. $\frac{1}{2}c$
c. c
d. $1\frac{1}{4}c$
e. $1\frac{3}{8}c$

22. Berapakah energi total suatu partikel yang massa diamnya m bergerak dengan kelajuan 0,8 c?
 a. mc^2
 b. $\frac{3}{5}mc^2$
 c. $\frac{4}{5}mc^2$
 d. $\frac{5}{3}mc^2$
 e. $\frac{5}{4}mc^2$
23. Hasil percobaan Morley dan Michelson menunjukkan bahwa
 a. eter berada di semua tempat
 b. kecepatan eter = 3×10^4 m/s
 c. eter sebagai media rambatan cahaya
 d. eter merupakan benda gas
 e. eter tidak ada
24. Salah satu kesimpulan percobaan Morley dan Michelson adalah
 a. waktu bergerak lebih cepat
 b. kecepatan cahaya sama untuk semua pengamat di jagat raya
 c. kecepatan cahaya bergantung gerak Bumi
 d. kecepatan cahaya tidak bergantung gerak Bumi
 e. massa bergerak lebih cepat
25. Sebuah gugusan bintang jika ditempuh dengan sebuah pesawat dari Bumi memerlukan waktu 20 tahun. Jika kelajuan pesawat itu 0,999998 c, jarak sebenarnya antara gugusan bintang itu ke Bumi adalah mendekati
 a. 20 tahun cahaya
 b. 40 tahun cahaya
 c. 100 tahun cahaya
 d. 4000 tahun cahaya
 e. 10000 tahun cahaya

 Keterangan:
 Jarak satu tahun cahaya adalah suatu jarak jika ditempuh oleh cahaya membutuhkan waktu satu tahun, atau jarak 1 tahun cahaya = $(3 \times 10^8$ m/s) $\times$ (1 tahun) = $(3 \times 10^8$m/s) (360 $\times$ 24 $\times$ 3600 detik) = $8{,}33 \times 10^{15}$m = $9{,}33 \times 10^{12}$ km.

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan tepat.

1. Dua pesawat antariksa P dan Q bergerak berlawanan arah. Seorang pengamat di Bumi mengukur kelajuan pesawat P sebesar 0,8 c dan kelajuan pesawat Q sebesar 0,6 c. Tentukanlah kelajuan pesawat P relatif terhadap pesawat Q.
2. Tentukanlah kelajuan sebuah partikel sehingga energi kinetiknya sama dengan energi diamnya.
3. Sebuah proton massa diamnya $1{,}7 \times 10^{-27}$ kg bergerak sehingga massa relativistiknya menjadi 1,25 kali massa diamnya. Berapakah energi kinetik proton tersebut?
4. Berapa kontraksi (pemendekan Lorentz) dari diameter Bumi yang diukur oleh seorang pengamat yang diam terhadap Matahari jika kecepatan orbit 3×10^4 m/s dan diameter Bumi 12.749 km.
 Petunjuk: gunakan pendekatan $(1+x)^n \approx (1+nx)$
5. Hitunglah momentum benda yang massanya 4 kg dan bergerak dengan kecepatan 2×10^8 ms.
6. Hitung kecepatan elektron jika energi kinetiknya 2 MeV. ($m_e = 9{,}1 \times 10^{-31}$ kg)
7. Seberkas cahaya dipancarkan dari sebuah pesawat yang bergerak dengan kelajuan tetap 0,5 c searah dengan arah gerak pesawat. Berapakah kelajuan cahaya itu diamati dari Bumi
 a. menurut hukum Newton; dan
 b. menurut teori relativitas Einstein?
8. Jarak dua buah tempat P dan Q di angkasa luar adalah L. Sebuah pesawat antariksa dapat menempuh jarak itu dengan kelajuan tetap 0,6 c dalam waktu 10 sekon.
 a. Tentukanlah jarak P dan Q tersebut yang sebenarnya (dalam satuan km).
 b. Jika pesawat lain yang bergerak dengan kelajuan 0,8 c, dalam waktu berapa detik ditempuh jarak antara P dan Q tersebut?
 c. Menurut pesawat pertama, berapakah jarak antara P dan Q tersebut (dalam km)?
9. Ada dua orang anak kembar A dan B. Tepat pada saat berusia 10 tahun, A pergi meninggalkan Bumi dengan sebuah pesawat yang memiliki kelajuan 0,98 c menuju sebuah planet di luar tata surya ini. Kemudian A kembali lagi ke Bumi. Pada saat itu, B sedang merayakan ulang tahun yang ke-40. Menurut A, usia mereka bukan 40 tahun. Berapa tahun usia mereka menurut A?
10. Panjang sebuah tongkat di Bumi adalah 5 m. Berapa panjang tongkat tersebut jika diukur oleh pengamat yang berada dalam pesawat antariksa yang sedang bergerak dengan kelajuan:
 a. 0,3 c;
 b. 0,7 c;
 c. 0,9 c.

Bab
10



Sumber: *Energy: Technology and Development*, 1995

Pembangunan PLTN merupakan salah satu solusi timbulnya krisis energi yang suatu saat akan dialami penduduk Bumi.

Fisika Inti dan Radioaktivitas

Hasil yang harus Anda capai:

menunjukkan penerapan konsep Fisika inti dan radioaktivitas dalam teknologi dan kehidupan sehari-hari.

Setelah mempelajari bab ini, Anda harus mampu:

- menganalisis karakteristik inti atom dan radioaktivitas;
- mendeskripsikan pemanfaatan radiokativitas dalam kehidupan sehari-hari dan teknologi untuk kesejahteraan manusia.

Listrik merupakan sesuatu yang sangat penting dalam kehidupan modern sekarang ini. Hampir seluruh aktivitas manusia membutuhkan energi listrik. Listrik diproduksi dari pembangkit-pembangkit tenaga listrik. Di Indonesia pembangkit listrik banyak yang berbahan bakar solar, walaupun ada sebagian kecil yang memanfaatkan air sebagai penggerak turbin. Permasalahan yang timbul adalah solar termasuk sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui sehingga suatu saat pasti akan habis. Jika hal ini terjadi negara kita akan berada dalam krisis energi.

Salah satu solusi yang ditawarkan adalah membangun PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir). Apakah Anda tahu bagaimana caranya uranium atau plutonium diubah menjadi energi listrik? Kendala yang dihadapi adalah masih banyak pihak yang menentang keberadaan PLTN. Apakah Anda tahu alasan mereka? Pada bab ini, Anda akan mempelajari tentang inti atom berikut reaksi-reaksi yang terjadi di dalamnya, dampak positif, dan dampak negatif pengembangan energi nuklir.

A. Inti Atom
B. Radioaktivitas
C. Reaksi Inti
D. Reaktor Nuklir, Bom Nuklir, dan Radioisotop

Tes Kompetensi Awal

Sebelum mempelajari konsep Fisika Inti dan Radioaktivitas, kerjakanlah soal-soal berikut dalam buku latihan.

1. Apa yang dimaksud dengan nomor atom dan nomor massa?
2. Apa yang dimaksud dengan isotop, isobar, dan isoton? Berikan contoh isotop.
3. Apa yang dimaksud dengan peluruhan?
4. Apa yang dimaksud dengan reaksi fusi dan reaksi fisi?
5. Apa bedanya reaksi nuklir dan reaksi kimia?

A. Inti Atom

Seperti yang sudah Anda pelajari pada Bab 8, atom terdiri atas partikel-partikel elementer, yaitu inti atom dan elektron. Inti atom terdiri atas proton dan neutron. Partikel-partikel elementer ini memiliki massa yang sangat kecil sehingga satuan yang digunakan bukanlah kilogram atau gram melainkan satuan massa atom yang didefinisikan sebagai seperduabelas kali massa satu atom C-12.

$$1 \text{ sma} = \frac{1}{12} \times \text{massa satu atom C-12}$$
$$1 \text{ sma} = 1{,}6604 \times 10^{-27} \text{ kg}$$
$$1 \text{ sma} = 931 \text{ MeV}$$

Berdasarkan model atom Bohr, atom terdiri atas inti atom yang bermuatan positif dan elektron yang bermuatan negatif. Elektron bergerak berputar mengelilingi inti. Untuk mengetahui sifat-sifat suatu inti, diperlukan pengetahuan tentang massa suatu atom yang dapat diukur dengan spektrometer massa.

1. Hipotesis Proton Elektron

Massa suatu atom bukanlah merupakan massa inti yang terlihat nyata, melainkan massa atom netral. Massa suatu atom juga mencakup massa elektron yang bergerak mengelilingi inti. Oleh karena satuan massa kilogram terlalu besar untuk ukuran massa suatu atom, secara konvensional ditetapkan satuan massa atom (*atomic massa unit* = amu). 1 amu = 1 sma = $1{,}6604 \times 10^{-27}$ kg. Dari pengukuran terhadap massa suatu atom, ternyata tidak semua unsur memiliki massa yang sama, walupun jenisnya sama. Unsur-unsur inilah yang disebut *isotop*. Salah satu contoh isotop yang paling sederhana adalah hidrogen. Massa atom hidrogen adalah berturut-turut 1,007825 sma; 2,014102 sma, dan 3,01605 sma yang secara berurutan diberi nama *hidrogen*, *deutrium*, dan *tritium*. Inti tritium disebut triton, inti deuterium disebut deutron, sedangkan isotop yang paling ringan disebut proton yang memiliki massa atom 1,00727665 sma.

Jika dilihat, inti atom harganya selalu mendekati kelipatan bilangan bulat dari massa atom hidrogen, yakni 1,007825 sma. Dari contoh tersebut, atom deutrium memiliki massa kira-kira 2 kali massa proton (inti hidrogen), sedangkan massa tritium kira-kira 3 kali massa proton. Kenyataan ini pada mulanya melahirkan suatu anggapan bahwa inti atom terdiri dari sejumlah atom hidrogen yang saling mengikat.

Akan tetapi, dari penelitian lebih lanjut ternyata bahwa massa inti selalu lebih besar daripada massa atom hidrogen. Sebagai contoh, atom seng, nomor atomnya 30, namun semua isotopnya bermassa lebih dari dua kali 30 atom hidrogen. Kenyataan ini menyebabkan timbulnya suatu dugaan bahwa elektron mungkin dapat berada di dalam inti dan

menetralkan beberapa buah proton. Inilah yang disebut dengan *hipotesis proton-elektron*. Hipotesis ini juga didukung oleh suatu kenyataan bahwa sinar beta yang dipancarkan oleh suatu inti adalah partikel yang massa dan muatannya sama dengan elektron.

2. Hipotesis Proton-Neutron

Pada 1930, dua orang ahli Fisika dari Jerman bernama **W. Bothe** dan **H. Becker** menemukan suatu gejala yang menjadi titik terang dalam mengungkapkan rahasia inti atom. Melalui percobaannya, kedua ahli ini menembaki keping berilium dengan partikel alfa yang diperoleh dari sampel polonium. Penembakan ini ternyata menghasilkan pancaran radiasi yang dapat menembus bahan-bahan dengan mudah, karena radiasi tidak bermuatan. **Bothe** dan **Becker** menganggap radiasi ini berupa sinar gamma. Namun, terdapat perbedaan antara daya tembus sinar ini dengan daya tembus sinar gamma.

Pada 1932, **James Chadwick** (1891–1974) mengusulkan suatu hipotesis tentang struktur inti atom berdasarkan pada hasil percobaan **W. Bothe** dan **H. Becker**. Menurut **Chadwick**, radiasi yang dipancarkan oleh keping berilium adalah suatu partikel yang tidak bermuatan (netral) yang dinamakan neutron serta mampu menembus bahan-bahan dengan mudah. Neutron memiliki massa yang hampir sama dengan proton dan memerlukan energi sebesar 5,7 MeV untuk dapat mengeluarkan neutron dari keping berilium. Sinar gamma memerlukan energi sebesar 55 MeV untuk menimbulkan efek yang sama dengan neutron.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa neutron bukanlah partikel yang stabil jika berada di luar inti atom. Neutron meluruh secara radioaktif menjadi proton, elektron, dan inti neutron dengan umur rata-rata 15,5 menit. Hasil percobaan menunjukkan massa neutron sebesar 1,0086654 sma atau sama dengan $1{,}6748 \times 10^{-27}$ kg. Proton dan neutron akhirnya diterima sebagai partikel dasar yang membentuk inti atom. Keduanya disebut nukleon.

3. Partikel Penyusun Inti

Jumlah nukleon yang terdapat di dalam inti suatu atom dilambangkan dengan A dan dinamakan nomor massa. Adapun jumlah proton dilambangkan Z yang berarti nomor atom. Jadi, sebuah inti atom dapat dilambangkan sebagai berikut.

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \qquad (10\text{–}1) $$

Keterangan:
A = nomor massa (jumlah neutron dan proton)
X = lambang unsur
Z = nomor atom
N = jumlah neutron (A–Z)

Contoh 10.1

Tentukan jumlah proton, neutron, dan nomor massa dari atom ${}^{12}_{5}B$.

Jawab:
Diketahui : Atom boron (B) terdiri dari 5 proton (nomor atom 5) dan 12 nomor massa.
Jadi, jumlah neutronnya (12 – 5) = 7 neutron

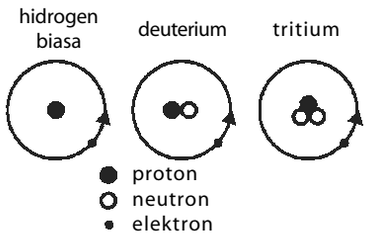


Informasi untuk Anda

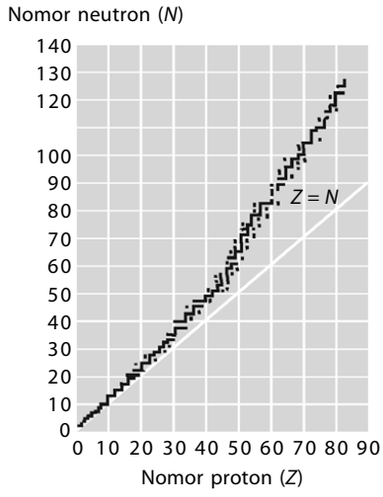
Eksperimen Rutherford menyatakan bahwa inti atom memiliki diameter sekitar 10^{-15} sampai 10^{-14} m. Dari teori kinetik dan khususnya analisis Einstein tentang gerak Browman, diameter atom memiliki ukuran sekitar 10^{-10} m. Itu artinya elektron akan terlihat berjarak sekitar 10.000 sampai 100.000 kali lipat ukuran inti diukur dari inti atom tersebut (jika inti diibaratkan bola *baseball*, atom akan memiliki diameter seukuran kota yang berdiameter beberapa kilometer). Jadi, sebuah atom sebagian besar berupa ruang kosong.

Information for You

Rutherford's experiments suggested that the nucleus must have a radius of about 10^{-5} to 10^{-14} m. From kinetic theory, and especially Einstein's analysis of Browman movement, the radius of atoms was estimated to be about 10^{-10} m. Thus the electrons would seem to be at a distance from the nucleus of about 10,000 to 100,000 times the radius of the nucleus itself (if the nucleus were the size of a baseball, the atom would have the diameter of a big city several kilometers across). So an atom would be mostly empty space.



Gambar 10.1
Isotop hidrogen



Sumber: *Konsep Fisika Modern*, 1983

Gambar 10.2
Diagram kestabilan inti (*N-Z*)

Pada sebuah atom netral, jumlah elektron-elektron yang mengorbit di sekeliling inti atom sama dengan jumlah nomor massa. Oleh karena itu, muatan pada elektron sama, tetapi berlawanan tanda dengan muatan sebuah proton. Sifat-sifat utama suatu atom ditentukan oleh jumlah elektronnya. Jadi, Z menentukan jenis atomnya. Indeks Z yang dibagian bawah kadang-kadang tidak ditulis, sehingga inti ditulis ${}_{15}\mathrm{N}$.

Nuklida dapat diklasifikasikan berdasarkan kestabilan dan kepadatannya di alam, serta berdasarkan kesamaan A, Z, dan N. Berdasarkan kestabilannya, nuklida terbagi menjadi nuklida stabil dan radionuklida.

a. Nuklida stabil, yaitu nuklida yang memiliki A dan Z tetap, contoh ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$.
b. Radionuklida, yaitu nuklida yang memiliki A dan Z yang dapat berubah. Nuklida ini tidak stabil dan secara spontan meluruh menjadi nuklida lain. Radionuklida terdiri atas radionuklida atom primer, radionuklida atom sekunder, radionuklida atom tersier, dan radionuklir.

Berdasarkan jumlah A, Z, dan N, nuklida dapat digolongkan menjadi isotop, isoton, isobar, dan isomer.

a. Isotop yaitu jumlah nuklida-nuklida yang memiliki Z sama tetapi A berbeda contohnya, ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{13}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$.
b. Isoton yaitu nuklida yang memiliki jumlah neutron sama, tetapi nomor massa berbeda contohnya, ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{14}_{7}\mathrm{N}$.
c. Isobar yaitu nuklida-nuklida yang memiliki A sama tetapi Z berbeda. Nuklida ini umumnya merupakan nuklida-nuklida cermin.
d. Isomer inti yaitu nuklida yang memiliki A dan Z sama serta sifat kimia yang sama tetapi tingkat energinya berbeda. Contoh, ${}^{124}\mathrm{S}_{6}$ memiliki tiga isomer, yaitu ${}^{124}_{6}\mathrm{Sb}$, ${}^{124}_{m1}\mathrm{Sb}$, ${}^{124}_{m2}\mathrm{Sb}$.

Perhatikan **Gambar 10.1**. Untuk atom hidrogen biasa ditulis ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$. Di sini, nomor atom dan nomor massa sama karena tidak terdapat neutron. Inti atom yang terdiri atas proton dan neutron dapat menerangkan keadaan isotop.

4. Stabilitas Inti

Stabilitas inti atom bergantung kepada jumlah proton dan jumlah neutron. **Gambar 10.2** memperlihatkan hubungan antara jumlah neutron ($N = A–Z$) terhadap jumlah proton untuk semua nuklida inti atom beserta isotopnya, baik untuk inti stabil maupun inti tak stabil dengan perbandingan $\frac{N}{Z}$.

Untuk inti atom yang stabil, berlaku hal-hal berikut.

a. Inti-inti atom yang paling ringan memiliki jumlah proton dan neutron yang hampir sama.
b. Inti atom yang lebih berat memerlukan lebih banyak neutron daripada proton. Inti atom yang paling berat memiliki jumlah neutron sekitar 51% atau 60% lebih banyak.
c. Kebanyakan dari inti atom itu memiliki jumlah proton dan neutron berupa bilangan genap. Contohnya, partikel alfa (dua neutron dan dua proton) membentuk kombinasi yang sangat stabil.

Untuk inti atom yang tidak stabil berlaku hal-hal berikut.

a. Desintegrasi, cenderung menghasilkan inti atom baru yang lebih dekat ke garis stabilitas dan terus berlangsung hingga terbentuk inti stabil.
b. Inti atom di atas garis kestabilan memiliki kelebihan neutron dan cenderung meluruh dengan memancarkan partikel beta (β).
c. Inti yang terletak di sebelah bawah garis stabilitas meluruh sehingga nomor atomnya berkurang. Perbandingan jumlah neutron dan protonnya bertambah besar. Pada inti atom berat ini terjadi dengan memancarkan partikel alfa (α).

Jadi, jika inti atom di sebelah kiri meluruh memancarkan partikel beta, nomor atom inti bertambah satu dan nomor massa tetap.

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A}_{Z+1}X + ^{0}_{-1}\beta$$

Contoh dari penambahan inti atom akibat pemancaran beta adalah

$$^{14}_{6}C \rightarrow ^{14}_{7}N + ^{0}_{-1}\beta$$

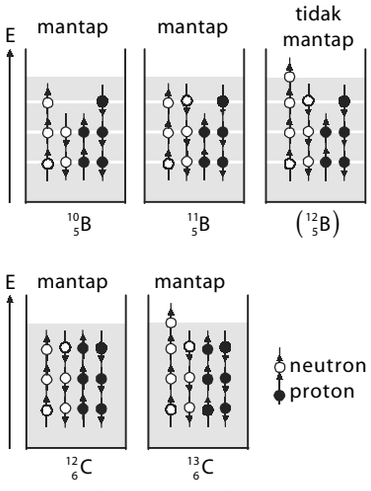
$$^{90}_{38}Sr \rightarrow ^{90}_{39}Y + ^{0}_{-1}\beta$$

Jika inti sebelah kanan meluruh akan memancarkan positron. Nomor atom inti berkurang satu, sedangkan nomor atom massa tetap.

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A}_{Z+1}X + ^{0}_{+1}\beta$$

Proton dan neutron yang membentuk inti atom mengikuti prinsip *ekslusi* (larangan). Di dalam inti atom, untuk setiap tingkat energi yang diperbolehkan hanya dapat ditempati dua proton dengan spin $\frac{1}{2}$ dan $-\frac{1}{2}$, serta dua buah neutron dengan spin $\frac{1}{2}$ dan $-\frac{1}{2}$. Sama halnya dengan tingkat energi atom, tingkat-tingkat energi dalam inti diisi menurut aturan tertentu, agar diperoleh susunan energi minimum. Sebagai contoh diperlihatkan diagram tingkat energi beberapa isotop, di antaranya $^{10}_{5}B$, $^{11}_{5}B$, $^{12}_{5}B$, $^{12}_{6}C$, dan $^{13}_{6}C$.

Gambar10.3 memperlihatkan diagram tingkat energi yang disederhanakan untuk beberapa isotop boron dan karbon. Prinsip ekslusi membatasi jumlah penghuni setiap tingkat pada dua neutron berspin berlawanan dan dua proton berspin berlawanan. Inti mantap memiliki konfigurasi dengan energi minimum.



Sumber: *Konsep Fisika Modern*, 1983

Gambar 10.3
Tingkat energi beberapa isotop

5. Energi Ikat Inti

Pada bagian awal telah dibahas bahwa inti atom terdiri atas proton dan neutron yang disebut sebagai nukleon. Seharusnya, massa suatu inti atom merupakan jumlah massa proton ditambah massa neutron yang ada di dalam inti tersebut. Akan tetapi, dari pengukuran-pengukuran yang dilakukan menunjukkan bahwa massa suatu atom ternyata kurang dari jumlah massa proton dan neutron yang membentuk inti tersebut. Contohnya adalah inti helium.

Inti helium terdiri atas 2 proton dan 2 neutron. Massa helium seharusnya

massa 2 × neutron = 2 × 1,008982 sma = 2,017964 sma
massa 2 × proton = 2 × 1,00759 sma = 2,015180 sma +

Jumlah massa $^{4}_{2}He$ = 4,033144 sma

Tabel 10.1
Massa Beberapa Isotop

Nama	Simbol	Massa (sma)
Neutron	${}_{0}^{1}O$	1,008665
Proton	${}_{1}^{1}H$	1,007825
Deutron	${}_{1}^{2}H$	2,014102
Triton	${}_{1}^{3}H$	3,016049
Helium-3	${}_{3}^{1}H$	3,016049
Helium-4	${}_{2}^{4}H$	4,002602
Alfa	${}_{2}^{4}\alpha$	4,0026
Lithium-6	${}_{3}^{6}Li$	6,0151
Lithium-7	${}_{4}^{7}Li$	7,0160
Berillium-8	${}_{4}^{8}Be$	8,0050
Berillium-9	${}_{4}^{9}Be$	9,0121
Boron-10	${}_{5}^{10}B$	10,0129
Boron-11	${}_{5}^{11}B$	11,0093
Carbon-12	${}_{6}^{12}C$	12,0000
Carbon-13	${}_{6}^{13}C$	13,0033
Carbon-14	${}_{6}^{14}C$	14,0030

Sumber: *Conceptual Physics*, 1998

Tabel 10.2
Massa Proton, Neutron, dan Elektron

Partikel	kg	sma	MeV
proton	$1{,}6726 \times 10^{-27}$	1,007276	938,28
neutron	$1{,}6750 \times 10^{-27}$	1,008665	939,57
elektron	$9{,}1090 \times 10^{-31}$	0,000549	0,511

Sumber: *Physics for Scientist and Engineers*, 2000

Tabel 10.3
Massa Beberapa Isotop

Isotop	Simbol	Massa (sma)
Neutron	n	1,008665
Hidrogen	${}_{1}^{1}H$	1,007825
Deuterium	${}_{1}^{2}H$	2,01410
Tritium	${}_{1}^{3}H$	3, 01605
Helium-4	${}_{2}^{4}He$	4, 00260
Karbon-12	${}_{6}^{12}C$	12,00000
Besi-58	${}_{26}^{58}Fe$	57,93328
Tembaga-63	${}_{29}^{63}Cu$	62, 92960
Krypton-90	${}_{36}^{90}Kr$	89,91959
Barium-143	${}_{56}^{143}Br$	142,92054
Uranium-235	${}_{92}^{235}U$	235,04395

Sumber: *Conceptual Physics*, 1998

Dari pengukuran terhadap massa inti helium, ternyata massa inti helium adalah 4,002604 sma. Ini berarti terdapat kekurangan massa sebesar 0,03054 sma. Terjadinya kekurangan massa ini disebabkan oleh nukleon yang membentuk inti, memerlukan energi untuk saling mengikat, sesuai dengan massa dan energi menurut Einstein yaitu $E = mc^2$. Jadi, massa ${}_{Z}^{A}X <$ ($Z \times$ massa proton + $(A - Z)$ massa n + Z massa elektron). Defek massa pada pembentukan nuklida ${}_{Z}^{A}X$ adalah

$$\Delta m = \left[Z m_p + (A - Z) m_n + Z m_e - m\,{}_{Z}^{A}X \right] \qquad (10\text{–}2)$$

Massa elektron mendekati nol, sehingga **Persamaan (10–2)** dapat ditulis

$$\Delta m = \left(Z m_p + (A - Z) m_n \right) - m\,{}_{Z}^{A}X \qquad (10\text{–}3)$$

Energi yang diperoleh dari kekurangan massa tersebut sesuai dengan hubungan massa dan energi menurut persamaan Einstein

$$\Delta E = \Delta m c^2 \qquad (10\text{–}4)$$

Keterangan:
ΔE = energi ikat inti (joule)
c = kecepatan cahaya (m/s)
Δm = defek massa (kg)

Jika hilangnya massa pada proses pembentukan inti sama dengan 1 sma, besarnya energi yang hilang ekivalen dengan

$$E_i = (1 \text{ sma})\ (1{,}667 \times 10^{-27} \text{ kg/sma})\ (3 \times 10^{8})^2 = 931{,}5 \text{ MeV}$$

Massa sebesar 1 sma ekivalen dengan energi 931,5 MeV, jadi

$$\Delta E_i = (\Delta m)(931{,}5)\text{MeV} \qquad (10\text{–}5)$$

dan energi ikat pada nuklida ${}_{Z}^{A}X$ adalah

$$\Delta E_i = [Z\, m_p + (A - Z)\, m_n + Z\, m_e - m\,{}_{Z}^{A}X\,]\ 931{,}5 \text{ MeV/sma} \qquad (10\text{–}6)$$

Jika $m_H = m_p + m_e$, maka persamaan tersebut dapat ditulis

$$\Delta E_i = [Z m_H + (A - Z)\, m_n - m\,{}_{Z}^{A}X\,]\ 931{,}5 \text{ MeV/sma} \qquad (10\text{–}7)$$

Keterangan:
ΔE_i = energi ikat inti (MeV)
m_n = massa neutron (sma)
m_p = massa proton (sma)
m_e = massa elektron (sma)
Z dan A = nomor atom dan nomor massa
$m\,{}_{Z}^{A}X$ = massa inti atom

Energi ikat inti belum dapat menggambarkan kestabilan nuklida. Perkiraan tentang kestabilan inti dapat dilakukan dengan memerhatikan harga energi ikat rata-rata per nukleon.

Contoh 10.2

Massa isotop ${}_{1}^{2}H$ adalah 2,014102 sma. Tentukan energi ikat inti ${}_{1}^{2}H$, jika massa atom ${}_{1}^{1}H$ = 1,007825 sma dan massa neutron = 1,008665 sma.

Jawab:
Diketahui: $m\ {}^{2}_{1}\mathrm{H} = 2{,}014102$ sma; $m\ {}^{1}_{1}\mathrm{H} = 1{,}007825$ sma; $m_n = 1{,}008665$ sma.

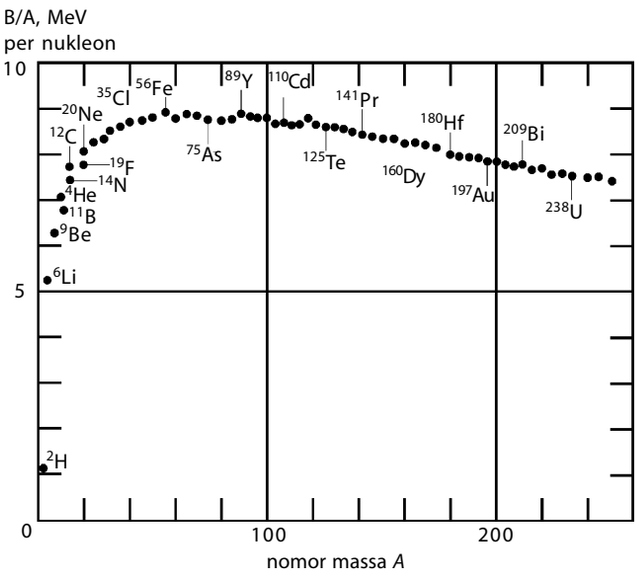
$$\Delta E_i = [Zm_H + (A-Z)m_n - m\ {}^{2}_{1}\mathrm{H}]\ 931{,}5\ \text{MeV/sma}$$
$$= [(1)(1{,}007825) + (2-1)(1{,}008665) - 2{,}014102]\ 931{,}5\ \text{MeV/sma}$$
$$= (0{,}002388\ \text{sma})(931{,}5\ \text{MeV/sma}) = 2{,}22\ \text{MeV}$$

Jadi, energi ikat pernukleonnya

$$E = \frac{\Delta E_i}{A} = \frac{2{,}22}{2}\ \text{MeV} = 1{,}11\ \text{MeV}$$

Semakin besar energi ikat rata-rata per nukleon, kestabilannya akan semakin tinggi karena diperlukan energi yang besar untuk membongkarnya. Grafik energi ikat per nukleon terhadap nomor massa berbagai inti dapat Anda perhatikan pada **Gambar 10.4**. Berdasarkan grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa:

a. untuk harga A yang kecil, energi ikatnya kecil dan naik cepat sesuai dengan pertambahan A;
b. untuk harga A disekitar 60, energi ikat maksimumnya hampir tidak bertambah, yaitu 8,8 MeV dan turun menjadi 8,4 MeV untuk A = 110;
c. untuk harga A di atas 140, energi ikatnya turun hingga mencapai 7,6 MeV.



Gambar 10.4
Grafik energi ikat per nukleon terhadap nomor massa berbagai inti.

6. Gaya Inti

Gaya inti bersifat saling menolak pada jangkauan sangat pendek dan saling menarik pada jarak nukleon yang agak jauh. Jika tidak demikian, nukleon dalam inti akan menyatu. Sifat-sifat gaya inti, antara lain:

a. gaya inti memiliki prinsip dasar yang berbeda dengan gaya gravitasi maupun gaya coulomb;
b. gaya inti tidak bergantung pada muatan listrik sehingga besarnya gaya antara proton-proton atau neutron adalah sama;
c. gaya inti bekerja pada jarak yang sangat pendek, yaitu sekitar 10^{-15} m atau 1 fermi;
d. gaya inti sangat besar sehingga diperlukan energi sebesar 8 MeV untuk memisahkan dua buah elektron.

Kata Kunci

- isotop
- hipotesis proton-elektron
- hipotesis proton-neutron
- nomor atom
- nomor massa
- nuklida
- defek massa
- energi ikat inti

Tes Kompetensi Subbab A

Kerjakanlah pada buku latihan.

1. Jelaskan dengan singkat efek penggabungan nukleon terhadap massa inti atom yang terbentuk.
2. Tentukan banyak proton, neutron, dan elektron dalam atom-atom berikut.
 a. ${}^{10}_{5}\mathrm{Be}$
 b. ${}^{29}_{14}\mathrm{Si}$
 c. ${}^{35}_{17}\mathrm{Cl}$
 d. ${}^{85}_{37}\mathrm{Rb}$
 e. ${}^{239}_{95}\mathrm{Am}$
3. Massa inti ${}^{24}_{12}\mathrm{Mg}$ adalah 23,993 sma. Massa nukleon bebas adalah massa proton 1,007 sma dan massa neutron 1,008 sma. (1 sma = 931,5 MeV)
 a. Tentukan susut massanya (defek massa).
 b. Tentukan energi ikat intinya.
4. a. Energi ikat ${}^{20}_{10}\mathrm{Ne}$ adalah 160,64 MeV. Carilah massa atomnya.
 b. Manakah inti yang lebih mantap, ${}^{7}_{3}\mathrm{Li}$ atau ${}^{8}_{3}\mathrm{Li}$? ${}^{9}_{4}\mathrm{Be}$ atau ${}^{10}_{4}\mathrm{Be}$.
5. Carilah defek massa, energi ikat inti, dan energi ikat per nukleon untuk atom ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$.

B. Radioaktivitas

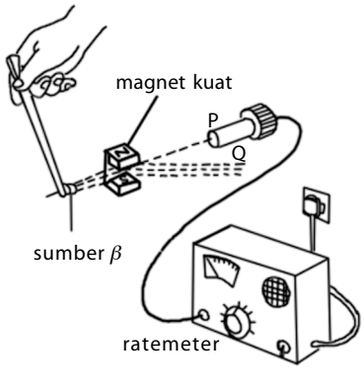
1. Sejarah Penemuan Radioaktif

Gejala radioaktif ini ditemukan oleh **Henry Becquerel** pada 1896 secara tidak sengaja. Ia sedang meneliti sifat *fosforesensi* dan *fluoresensi* pada garam uranium yang disinari dengan sinar-X. *Sifat fosforesensi adalah berpendarnya suatu zat jika terkena rangsangan cahaya meskipun rangsangan itu dihentikan*. Misalnya, pada rambu-rambu lalu lintas yang bersinar jika terkena sorotan lampu.

Garam uranium yang dipergunakan **Becquerel**, diletakkan pada bungkusan plat fosforesensi dan dijemur di bawah sinar Matahari. Ketika plat fosforesensi dicuci atau diproses pada film negatif ternyata terdapat pola hitam sesuai bentuk kristalnya. **Becquerel** menyimpulkan bahwa radiasi yang menghitamkan plat potret bukanlah berasal dari cahaya luar melainkan berasal dari garam itu sendiri. Oleh sebab itu, gejala ini disebut gejala radioaktif atau radioaktivitas.

2. Jenis-Jenis Radioaktif

Dari penemuan **Becquerel**, banyak ilmuwan yang kemudian meneliti tentang sinar radioaktif ini, salah satunya adalah **Ernest Rutherford**. Pada 1903, ia dengan postulatnya menyatakan bahwa radioaktif bukan hanya disebabkan oleh perubahan yang bersifat atomis, melainkan pemancaran radioaktif berlangsung bersamaan dengan perubahan tersebut. **Rutherford** memperlihatkan adanya dua macam radiasi yang keluar dari uranium dengan cara mengukur kuat arus listrik yang timbul oleh adanya ionisasi udara.



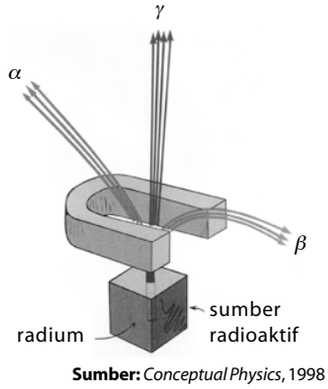
Sumber: *Physics for 'O' Level*, 1990

Gambar 10.5
Pengujian pembiasan sinar β dalam medan magnet.

Pada 1898, **Marie Curie** dan suaminya **Pierre Curie** menemukan dua unsur radioaktif yang disebut polonium dan radium. Berdasarkan terjadinya sinar radioaktif ini, maka radioaktivitas dapat dibedakan menjadi dua kategori, antara lain:

a. radioaktif alamiah, yaitu pemancaran sinar radioaktif yang terjadi secara spontan akibat tidak stabilnya inti atom;
b. radioaktif buatan, yaitu pemancaran sinar radioaktif yang berasal dari inti-inti stabil yang diganggu kestabilannya dengan cara-cara tertentu, hingga menjadi inti yang tidak stabil.

Salah satu jenis radiasi yang mudah diserap adalah sinar alfa (α). Radiasi lain yang memiliki daya tembus lebih besar dinamakan sinar beta (β), serta sebuah panjang gelombang yang pendek disebut sinar gamma (γ).



Sumber: *Conceptual Physics*, 1998

Gambar 10.6
Dalam medan magnet, hanya sinar γ yang tidak dibelokkan.

Anda dapat mengetahui karekteristik sinar α, sinar β, dan sinar γ melalui pembiasan radiasi dengan tabung GM (Geiger Muller). Perhatikan **Gambar 10.5**. Ketika sumbu radioaktif ditempatkan pada salah satu ujung medan magnet dan tabung GM pada ujung yang lain, ternyata sinar α dibiaskan ke piringan negatif dan sinar β akan dibiaskan ke piringan positif. Jadi, dapat disimpulkan bahwa sinar α bermuatan positif ($^4_2\alpha$ atau ^4_2He), sinar β bermuatan negatif ($^0_{-1}\beta$ atau e^-), sedangkan sinar γ netral ($^0_0\gamma$).

Berikut ini akan dijelaskan pemancaran sinar alfa (α), sinar beta (β), dan sinar gamma (γ).

a. Pemancaran Sinar Alfa (α)

Massa maupun muatan sinar alfa identik dengan inti helium (He). Jika suatu zat radioaktif memancarkan sinar alfa, nomor atom zat itu

akan berkurang 2 dari nomor atom induknya dan nomor massanya akan berkurang 4. Secara umum, reaksi pemancaran alfa (α) dapat dituliskan sebagai berikut.

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}X + ^{4}_{2}\alpha$$

Contoh: $^{238}_{92}U \rightarrow ^{234}_{90}X + ^{4}_{2}\alpha$

b. Pemancaran Sinar Beta (β)

Muatan dan massa sinar β sama dengan elektron. Hal ini karena sinar beta tidak lain adalah elektron (diberi lambang $^{0}_{-1}\beta$ atau $^{0}_{-1}e$). Sesuai dengan Hukum Kekekalan Nomor Massa dan Nomor Atom, suatu inti induk yang secara spontan memancarkan sinar β akan menghasilkan inti anak yang nomor massanya tetap dan nomor atomnya bertambah satu. Secara umum, reaksi pemancaran β ditulis sebagai berikut.

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A}_{Z+1}Y + ^{0}_{-1}\beta + \upsilon$$

Contoh: $^{14}_{6}C \rightarrow ^{14}_{7}N + ^{0}_{-1}\beta + \upsilon$

dengan υ adalah neutrino.

c. Pemancaran Sinar Gamma (γ)

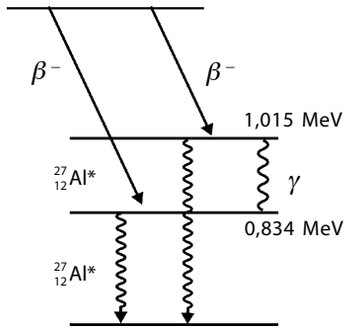
Berbeda halnya dengan pemancaran sinar α dan sinar β yang memancarkan partikel bermuatan, pemancaran sinar γ bukanlah berbentuk partikel tetapi gelombang elektromagnetik. Jika pada pemancaran sinar α dan β terjadi perubahan struktur jumlah proton dan neutron, pada pemancaran sinar γ terjadi perubahan susunan partikel-partikel pembentuk inti atom. Sinar γ tidak memiliki massa maupun muatan. Oleh karena itu nuklida tereksitasi yang memancarkan sinar γ tidak mengalami perubahan nomor atom maupun nomor massa.

Pemancaran sinar γ diawali oleh inti induk X yang secara spontan memancarkan sinar β dan membentuk inti baru Y^{*} yang berada dalam keadaan eksitasi. Selanjutnya, inti baru dalam keadaan eksitasi ini secara spontan memancarkan sinar γ untuk menjadi inti stabil (Y). proses perubahan ini ditunjukkan pada **Gambar 10.7**. Reaksi inti pemancaran sinar γ ini biasanya ditulis sebagai berikut.

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A}_{Z+1}Y + ^{0}_{-1}\beta + ^{0}_{0}\gamma$$

Contoh: $^{12}_{5}B \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{0}_{-1}\beta + ^{0}_{0}\gamma$

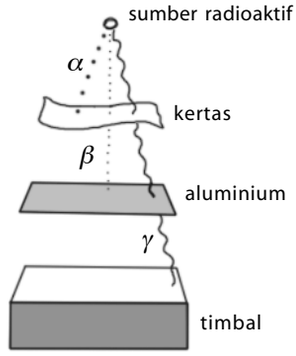
Kesimpulan dari karakteristik sinar radioaktif, yaitu sinar α, sinar β, dan sinar γ ditunjukkan pada **Tabel 10.4**. Daya tembus sinar α, sinar β, dan sinar γ masing-masing ditunjukkan pada **Gambar 10.8**.



Gambar 10.7
Pemancaran β dan γ dalam peluruhan $^{27}_{12}Mg$ dan $^{27}_{13}Al$.

Tugas Anda 10.1

Carilah informasi mengenai pemanfaatan sinar α, β, dan γ.



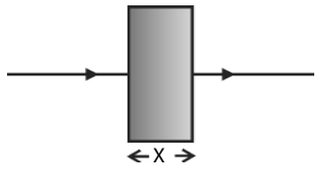
Sumber: *Conceptual Physics*, 1998

Gambar 10.8
Daya tembus partikel α, β, dan γ.

Tabel 10.4
Karakteristik Sinar Radioaktif

Jenis Sinar Radioaktif	Reaksi Alamiah	Muatan	Massa	Pembiasan dalam Medan Magnet	Kemampuan Daya Tembus
Alfa (α)	Inti helium	Positif	Besar	Kecil	Kertas tipis Kulit manusia
Beta (β)	Elektron	Negatif	Rendah	Besar	Aluminium (5 mm)
Gamma (γ)	Radiasi elektromagnetik	Tidak bermuatan	Tidak bermassa	Tidak dibiaskan	Timbal tipis

Sumber: *Physics for 'O' Level*, 1990



Gambar 10.9
Pelemahan intensitas oleh bahan dengan ketebalan X.

3. Pelemahan Intensitas Sinar Radioaktif

Jika sinar radioaktif dilewatkan pada sebuah keping dengan ketebalan x, ternyata intensitas sinar radioaktif sebelum melewati bahan (I_0) lebih besar daripada setelah melewati bahan (I). Pelemahan intensitas ini memenuhi persamaan:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \qquad (10\text{–}8)$$

Keterangan:
μ = koefisien pelemahan bahan (1/m);
e = bilangan natural = 2,71828

Seandainya intensitas sinar radioaktif setelah melewati keping tinggal separuh dari intensitas sinar radioaktif semula $\left(I = \frac{1}{2} I_0\right)$, maka **Persamaan (10–8)** dapat disederhanakan menjadi:

$$\begin{aligned} I &= I_0 e^{-\mu x} \\ \frac{1}{2} I_0 &= I_0 e^{-\mu x} \\ \frac{1}{2} &= e^{-\mu x} \\ \ln 1 - \ln 2 &= -\mu x \\ 0 - 0{,}693 &= -\mu x \end{aligned}$$

sehingga diperoleh

$$x = \frac{0{,}693}{\mu} \qquad (10\text{–}9)$$

Harga x pada **Persamaan (10–9)** disebut *Half Value Layer* (HVL) atau lapisan harga paruh.

Tokoh

Marie Curie
(1867–1934)



Sumber: *Science Encyclopedia*, 1998

Marie Curie dilahirkan di Warsawa, Polandia. Nama aslinya adalah **Marie Sklodowska**. Ia belajar Matematika, Fisika, dan Kimia di Paris. **Marie** bersuamikan **Pierre Curie** seorang ahli fisika juga. Mereka bekerja sama dalam meneliti radiasi yang dihasilkan oleh bahan radioaktif dan mereka berhasil menemukan unsur thorium yang bersifat radioaktif. Pada 1898, mereka menemukan dua unsur radioaktif baru, yaitu polonium dan radium. Untuk keberhasilan ini, **Marie** dan **Pierre Curie** serta Henri Becquerel mendapat hadiah Nobel untuk bidang Fisika pada 1903. Pada 1910, **Marie** berhasil memisahkan radium murni dan mempelajari sifat-sifat kimianya. Untuk hasil kerja kerasnya ini, **Marie** kembali mendapatkan hadiah Nobel yang kedua dalam bidang kimia pada 1911. **Marie** meninggal tahun 1934 akibat kanker, yang mungkin disebabkan ia terlalu lama berinteraksi dengan bahan-bahan radioaktif.

Contoh 10.3

Suatu keping memiliki HVL 3 cm. Berapakah besar intensitas sinar radioaktif setelah melewati keping setebal 9 cm?

Jawab:

Diketahui: HVL $= 3 \text{ cm} = 3 \times 10^{-2} \text{ m}$
$x = 9 \text{ cm} = 9 \times 10^{-2} \text{ m}$

$$\text{HVL} = \frac{0{,}693}{\mu} \rightarrow \mu = \frac{0{,}693}{3 \times 10^{-2} \text{ m}} = 23{,}1 \text{ /m}$$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \rightarrow \frac{I}{I_0} = 2{,}71828^{(-23{,}1 \text{ /m})(9 \times 10^{-2} \text{ m})} \rightarrow I = 0{,}125\ I_0$$

Jadi, intensitas sinar radioaktif setelah melalui keping adalah 0,125 I_0.

4. Peluruhan Radioaktif (Desintegrasi)

Peluruhan terjadi secara spontan dan tidak dapat dikontrol serta dipengaruhi oleh persenyawaan kimia dan fisika seperti pengaruh suhu dan tekanan. Dari hasil penelitian diperoleh bahwa kemampuan suatu unsur untuk meluruh berbeda-beda. Ada unsur yang dalam waktu singkat semua intinya meluruh, dan ada pula yang meluruh dengan lambat. Contohnya, sejumlah besar inti atom N dari suatu radioisotop yang meluruh memancarkan partikel-partikel α dan β serta diikuti pemancaran γ.

Jumlah rata-rata atom (dN) yang akan meluruh dalam waktu dt adalah berbanding lurus dengan jumlah atom N sehingga dapat diberikan dalam persamaan

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \qquad (10\text{–}10)$$

di mana λ disebut konstanta peluruhan yang merupakan karakteristik dari suatu radioisotop tertentu. Tanda negatif menunjukkan bahwa jumlah atom unsur induk berkurang. Jika **Persamaan (10–10)** diintegrasikan

$$\int_{N_0}^{N} \frac{dN}{dt} = \int_{t_0}^{t} \lambda \, dt \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

diperoleh

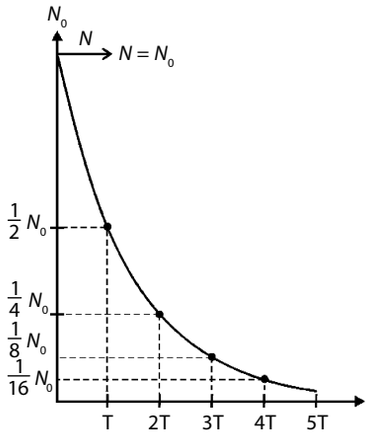
$$N = N_0 \, e^{-\lambda t} \qquad (10\text{–}11)$$

Keterangan:
N_0 = jumlah inti radioaktif mula-mula
N = jumlah inti radioaktif yang meluruh pada waktu t

Jumlah yang meluruh per satuan waktu adalah λN disebut juga dengan *Aktivitas* (A) dari suatu zat radioaktif. **Persamaan (10–11)** dapat juga ditulis

$$A = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{atau} \quad A = A_0 e^{-\lambda t} \qquad (10\text{–}12)$$

dengan A_0 = aktivitas radioaktif meluruh pada waktu $t = 0$.



Gambar 10.10
Peluruhan inti atom

a. Waktu Paruh

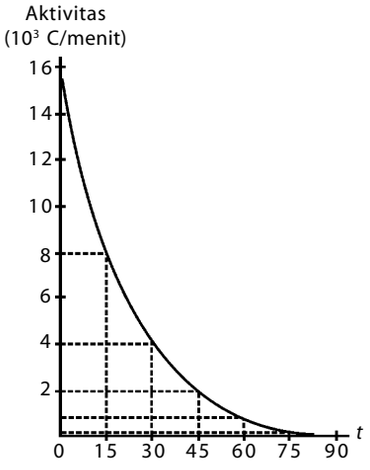
Pada waktu aktivitas berubah menjadi setengah aktivitas mula-mula $\left(\frac{1}{2}A_0\right)$, maka waktu yang diperlukan untuk peluruhan disebut *waktu paruh* (*half life*) dan disingkat dengan $T_{\frac{1}{2}}$. Jadi, untuk $N(t) = \frac{1}{2}N_0$ **Persamaan (10–11)** menjadi:

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}} \Rightarrow \ln \frac{1}{2} = -\lambda T_{\frac{1}{2}} \Rightarrow \ln 2 = \lambda T_{\frac{1}{2}}$$

sehingga

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0{,}693}{\lambda} \qquad (10\text{–}13)$$

Konstanta peluruhan λ dapat dirumuskan dengan $\lambda = \frac{0{,}693}{T_{\frac{1}{2}}}$. Hubungan antara aktivitas atau jumlah atom dengan waktu paruh dilukiskan pada **Gambar 10.11**.



Gambar 10.11
Peluruhan unsur ^{23}Na dengan $T_{\frac{1}{2}}$ = jam.

Dengan memerhatikan grafik pada **Gambar 10.11** berarti untuk $t = nT$ berlaku

$$N = \left(\frac{1}{2}\right)^n N_0 \quad \text{dengan} \quad n = \frac{t}{T_{\frac{1}{2}}} \qquad (10\text{–}14)$$

Persamaan (10–14) menunjukkan hubungan antara inti atom yang belum meluruh (inti sisa) N, inti mula-mula N_0, dan kelipatan waktu paruh. Jika setiap ruas dikalikan λ, akan didapatkan

$$\lambda N = \left(\frac{1}{2}\right)^n N_0 \lambda$$

$$\boxed{A = \left(\frac{1}{2}\right)^n A_0} \qquad (10\text{–}15)$$

Keterangan:
A = aktivitas unsur setelah waktu t
A_0 = aktivitas unsur mula-mula

b. Satuan Radioaktivitas

Aktivitas 1 gram ^{226}Ra dinyatakan sebagai satuan radioaktivitas sebesar 1 Curie (Ci). Oleh karena 1 gram ^{226}Ra mengandung $\frac{6{,}022 \times 10^{23}}{226}$ atom dengan laju peluruhan per detik sama dengan $\lambda = 1{,}38 \times 10^{-11}$, maka

$$1 \text{ Curie} = 1 \text{ Ci} = \frac{\left(1{,}38 \times 10^{-11}\right)\left(6{,}022 \times 10^{23}\right)}{226}$$

$$= 3{,}7 \times 10^{10} \text{ disintegrasi/sekon}$$

Satuan SI untuk radioaktivitas adalah Becquerel (Bq) yang didefinisikan sebagai aktivitas 1 disintegrasi/sekon. Dengan demikian, 1 Ci = $3{,}7 \times 10^{10}$ Bq = 37 GBq.

Contoh 10.4

Hitunglah tetapan peluruhan dari partikel pengion yang memiliki waktu paruh 4 tahun.

Jawab:

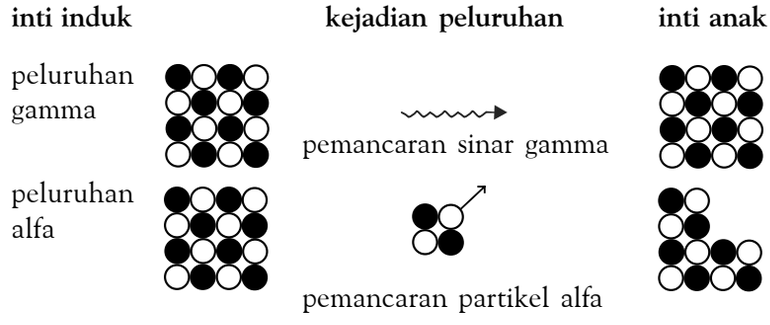
Diketahui: $T_{\frac{1}{2}} = 4$ tahun

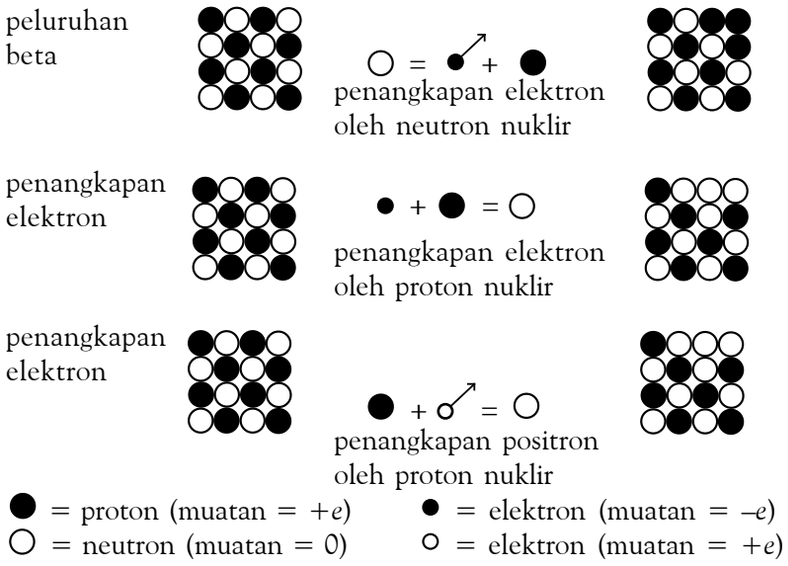
Dengan menggunakan persamaan $T_{\frac{1}{2}} = \frac{0{,}693}{\lambda}$, diperoleh

$$\lambda = \frac{0{,}693}{T_{\frac{1}{2}}} = \frac{0{,}693}{4} = 0{,}17/\text{tahun}$$

Jadi, tetapan peluruhan adalah 0,17/tahun.

Peluruhan radioaktif merupakan proses yang acak, yaitu inti tersebut meluruh secara tidak berkaitan satu dengan yang lainnya. Berikut ini diperlihatkan lima jenis peluruhan radioaktif.





Gambar 10.12
Lima jenis peluruhan radioaktif

Contoh 10.5

Aktivitas sebuah sumber radioaktif berkurang $\frac{1}{8}$ bagian dari aktivitas awalnya dalam selang waktu 30 jam. Tentukan waktu paruh dan tetapan peluruhannya.

Jawab:

Diketahui: $A = \frac{1}{8}A_0$

$t = 30$ jam

Untuk menentukan waktu paruh, dapat digunakan persamaan

$$A = \left(\frac{1}{2}\right)^n A_0 \rightarrow \frac{1}{8} = \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

$$\left(\frac{1}{2}\right)^3 = \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

maka $n = 3$

$$\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}} = 3 \rightarrow T_{\frac{1}{2}} = \frac{t}{3} \rightarrow \frac{30}{3} = 10 \text{ jam}$$

Jadi, waktu paruh sumber radioaktif adalah 10 jam.

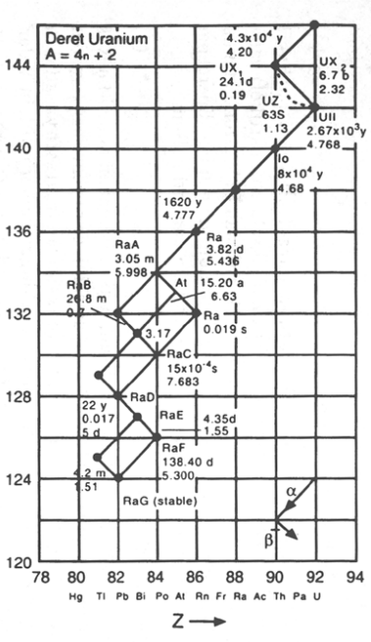
Untuk menentukan tetapan peluruhan, digunakan persamaan

$$\lambda = \frac{0{,}693}{T_{\frac{1}{2}}} = \frac{0{,}693}{10} = 0{,}0693/\text{jam}$$

Jadi, tetapan peluruhannya adalah 0,0693/jam.

4. Deret Radioaktif

Dalam pemancaran sinar radioaktif, inti yang terjadi tidak langsung menjadi inti stabil dan masih dapat memancarkan sinar radioaktif. Hal ini berlangsung secara terus-menerus sehingga diperoleh inti yang stabil. Misalnya, peluruhan $^{238}_{92}U$ akan meluruh menjadi inti atom $^{234}_{90}Th$ dan berakhir pada inti atom $^{206}_{82}Pb$ yang stabil. Oleh karena dimulai dari uranium, deret ini disebut deret uranium.



Sumber: *Konsep Fisika Modern*, 1983

Gambar 10.13
Deret uranium

Adapun deretan peluruhan α dan β yang berlangsung dari inti induk menjadi inti yang mantap sebagai hasil akhir untuk deret uranium ditunjukkan oleh **Gambar 10.13**.

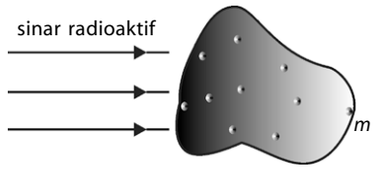
Proses peluruhan radioaktif berantai mengikuti suatu deret radioaktif. Ada empat deret radioaktif seperti tercantum pada **Tabel 10.5**.

Tabel 10.5
Deret Radioaktif

Nomor Massa	Deret	Induk	Umur Paruh Tahun	Produk Mantap Akhir
4n	Thorium	$^{232}_{90}Th$	$1{,}39 \times 10^{10}$	$^{208}_{82}Pb$
4n + 1	Neptunium	$^{237}_{93}Np$	$2{,}25 \times 10^{6}$	$^{209}_{83}Bi$
4n + 2	Uranium	$^{238}_{92}U$	$4{,}51 \times 10^{9}$	$^{206}_{82}Pb$
4n +3	Aktinium	$^{235}_{92}U$	$7{,}07 \times 10^{8}$	$^{207}_{82}Pb$

Sumber: *Konsep Fisika Modern*, 1983

5. Pengertian Dosis Serapan



Gambar 10.14
Energi radiasi yang diserap materi bermassa *m*.

Seperti dijelaskan pada awal bab, bahwa untuk mencapai kestabilannya setiap unsur radioaktif selalu memancarkan sinar radioaktif. Dalam perambatannya, sinar radioaktif tersebut membawa energi. Jika sinar radioaktif ini mengenai suatu materi, energinya akan diserap oleh materi tersebut. Perhatikan **Gambar 10.14**.

Banyaknya energi radiasi pengion yang diserap oleh materi per satuan massa tertentu disebut *dosis serap*. Secara matematis ditulis

$$D = \frac{E}{m} \qquad (10\text{–}16)$$

Keterangan:
D = dosis serap
m = massa materi penyerap energi
E = energi radiasi
Satuan dosis serap dalam SI adalah gray (Gy).
Dengan 1 Gy = 1 J/kg = 100 rad.

Contoh 10.6

Suatu materi yang massanya 100 gram menyerap energi radiasi pengion berupa sinar gamma sebesar 2×10^{-4} Joule. Tentukanlah besar dosis serap materi itu.

Jawab:
Diketahui: $m = 100$ gram $= 0{,}1$ kg
$E = 2 \times 10^{-4}$ J
Hitung besarnya dosis serap dari suatu materi yang massanya 200 gram, jika materi tersebut menyerap energi radiasi pengion sebesar 4×10^{-4} joule.

$$D = \frac{E}{m} = \frac{2 \times 10^{-4}\ \text{J}}{0{,}1\ \text{kg}}$$
$$= 2 \times 10^{-3}\ \text{J/kg}$$

Jadi, besar dosis serap materi itu adalah 2×10^{-3} joule/kg atau 2×10^{-3} gray.

Kata Kunci

- radioaktivitas
- *fluorisensi*
- eksitasi
- daya tembus
- peluruhan
- waktu paruh
- aktivitas
- dosis serap

6. Pengukuran Radioaktivitas

Sinar yang dipancarkan oleh unsur radioaktif tidak dapat dirasakan oleh manusia. Untuk itu diperlukan alat yang dapat mengukur dan mendeteksi keaktifan suatu unsur atau untuk mengetahui ada dan tidaknya sinar-sinar radioaktif.

Sinar yang dipancarkan oleh inti unsur radioaktif dapat mengionkan atom dari zat-zat yang dilaluinya. Alat untuk mendeteksi dan mengukur keaktifan suatu unsur dibuat berdasarkan sifat tersebut. Beberapa alat deteksi sinar radioaktif adalah emulsi film potret, pencacah Geiger-Muller, kamar kabut Wilson, dan sintilator.

a. Emulsi Film Potret

Sinar yang dipancarkan oleh unsur radioaktif, mengionkan lapisan emulsi sepanjang lintasan yang dilaluinya di atas permukaan film potret. Jika film potret itu dicuci dan dicetak, lintasan sinar radioaktif dapat dilihat dan diukur.

b. Pencacah Geiger-Muller

Pencacah Geiger-Muller disebut juga pencacah Geiger (*Geiger counter*). Pencacah Geiger adalah alat untuk mengukur keaktifan unsur radioaktif. Pencacah Geiger merupakan alat deteksi sinar radioaktif yang paling banyak digunakan. Alat pencacah Geiger ditunjukkan pada **Gambar 10.15**.

Peralatan ini terdiri atas sebuah tabung silinder terbuat dari logam. Di dalam tabung dipasang sebuah kawat konduktor yang halus. Kawat itu bertindak sebagai katode dan tabung sebagai anode. Tabung itu diisi dengan gas atau campuran gas dengan tekanan rendah (10 cmHg).

Tabung dan kawat diberi beda potensial kira-kira 1.000 volt untuk mempercepat ion dari gas yang terbentuk di dalam tabung. Sinar radioaktif yang masuk melalui jendela tipis pada salah satu ujung tabung akan mengionkan gas yang berada di dalam tabung. Arus listrik yang dihasilkan oleh ion yang terbentuk itu sangat lemah. Akan tetapi, beda tegangan 1.000 volt akan mempercepat ion itu. Ion yang dipercepat itu mengionkan lagi atom-atom gas yang lain sehingga arus listrik yang terjadi cukup besar. Dalam waktu yang singkat arus terputus, tetapi setiap kali partikel radioaktif masuk ke dalam tabung, timbul pulsa arus listrik dalam rangkaian. Pulsa ini diperkuat sehingga dapat dipakai untuk menyalakan rangkaian pencacah elektronik.

c. Kamar Kabut Wilson

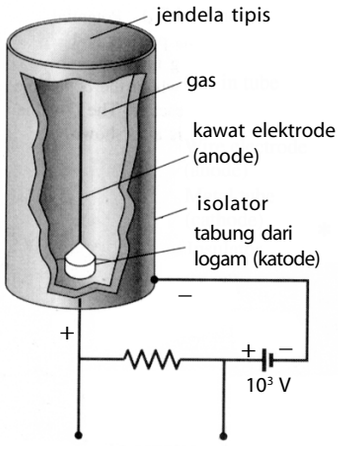
Kamar kabut Wilson adalah alat untuk melihat dan memotret lintasan partikel alfa yang melalui gas. Alat itu terdiri atas silinder tertutup dengan piston berisi udara bercampur uap air jenuh atau nitrogen.

Perhatikan **Gambar 10.17**. Pada dinding bagian dalam diletakkan unsur radioaktif (*R*). Partikel alfa yang dipancarkan oleh unsur itu akan mengionkan molekul-molekul gas di dalam silinder. Sementara itu, piston *P* ditarik keluar sehingga uap jenuh tadi akan mendingin secara tiba-tiba sehingga butir-butir uap air di dalam silinder menjadi jenuh. Ion-ion yang terbentuk sepanjang lintasan partikel alfa menarik butir-butir uap air, dan dapat dilihat atau dipotret jika gas di dalam silinder disorot dengan cahaya lampu.



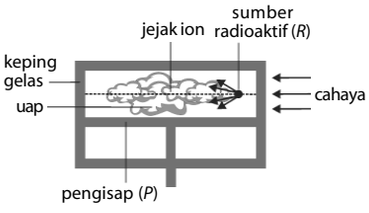
Sumber: *Conceptual Physics*, 1998

Gambar 10.15
Pencacah Geiger-Muller

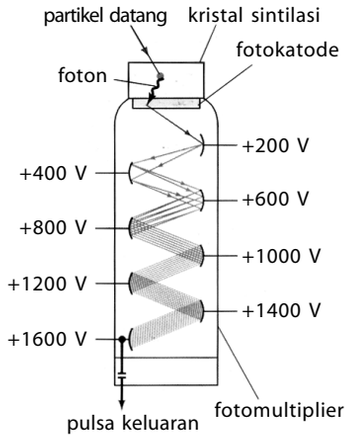


Sumber: *Physics for Scientist and Engineers*, 2000

Gambar 10.16
Bagian-bagian alat pencacah Geiger-Muller



Gambar 10.17
Kamar kabut Wilson



Sumber: *Physics for Scientist and Engineers*, 2000

Gambar 10.18
Diagram sintilator yang dilengkapi dengan fotomultiplier

d. Sintilator (Detektor Sintilasi)

Prinsip kerja sintilator (*scintillation counter*) berdasarkan fluoresensi zat yang ditimbulkan oleh sinar radioaktif. Sinar radioaktif dijatuhkan ke permukaan layar fluoresensi. Cahaya yang dipancarkan oleh layar fluoresensi dijatuhkan ke atas permukaan logam sehingga permukaan logam tersebut mengeluarkan elektron. Kemudian, elektron tersebut dijatuhkan kembali ke atas permukaan logam kedua. Logam kedua mengeluarkan elektron lebih banyak daripada elektron yang keluar dari permukaan logam pertama.

Keping-keping logam yang dapat melipatgandakan elektron terdapat di dalam sebuah alat yang disebut fotomultiplier (*photomultiplier*). Fotomultiplier adalah alat untuk memperkuat pulsa arus listrik. Arus listrik tersebut berasal dari tembakan sinar radioaktif di atas layar fluoresensi. Pulsa arus listrik kemudian disalurkan ke alat pencatat seperti pengeras suara, meter skala, dan lain-lain.

Tes Kompetensi Subbab B

Kerjakanlah pada buku latihan.

1. Perhatikan reaksi peluruhan berikut.
 $^{235}_{92}\text{U} \xrightarrow{A} {}^{235}_{92}\text{U} \xrightarrow{B} {}^{234}_{91}\text{Pa}$
 Tentukan partikel A dan B yang dipancarkan.
2. a. Suatu unsur radioaktif memiliki waktu paruh $\frac{1}{15}$ menit. Hitung konstanta peluruhannya.
 b. Jika konstanta peluruhan suatu bahan radioaktif $2{,}89 \times 10^{-3}$ kejadian/sekon, berapakah waktu paruhnya?
3. Waktu paruh dari radon 3,9 hari. Berapa waktu yang diperlukan agar tersisa $\frac{1}{32}$ dari mula-mula?
4. Suatu bahan memiliki HVL 9 cm. Jika tebal bahan 5 cm, berapa intensitas sinar radioaktif yang diserap oleh bahan tersebut?
5. Sesudah 2 jam, seperenambelas bagian suatu unsur radioaktif masih tersisa. Hitung waktu paruh unsur tersebut.
6. Sebuah fosil tulang binatang ditemukan oleh seorang arkeolog. Setelah diteliti, ternyata mengandung sisa karbon-14 sebesar 25% dibandingkan karbon-14 pada tulang binatang yang masih hidup. Jika waktu paruh karbon–14 itu 5.600 tahun, tentukan umur fosil itu.
7. Massa unsur $^{200}_{79}\text{Au}$ radioaktif yang meluruh adalah 3×10^{-9} kg. Jika aktivitas unsur radioaktif itu $2{,}18 \times 10^{12}$ Bq, tentukan besar konstanta peluruhannya.

C. Reaksi Inti

Gejala radioaktif adalah aktivitas suatu inti menjadi inti lain. Pancaran sinar α hanya mengurangi nukleon dalam inti dengan dua proton dan dua neutron. Adapun pancaran sinar β hanya mengubah satu neutron dalam inti menjadi proton. Orang pertama yang mengamati reaksi inti adalah **Ernest Rutherford**. Pada 1919, **Rutherford** mempelajari gejala tumbukan antar partikel α dengan atom-atom gas nitrogen (N_2) dan menimbulkan suatu reaksi yang disebutnya reaksi inti. Hasil reaksi inti ditulis dengan

$$^{4}_{2}\text{He} + {}^{14}_{7}\text{N} \rightarrow {}^{17}_{8}\text{O} + {}^{1}_{1}\text{H}$$

Perhatikan bahwa jumlah nomor atom dan jumlah nomor massa ruas kiri sama dengan jumlah nomor atom dan nomor massa ruas kanan.
Jumlah nomor atom sebelum reaksi $2 + 7 = 9$
Jumlah nomor atom sesudah reaksi $8 + 1 = 9$
Jumlah nomor massa sebelum reaksi $4 + 14 = 18$
Jumlah nomor massa sesudah reaksi $17 + 1 = 18$

Pada setiap reaksi inti selalu berlaku hukum kekekalan berikut ini.

1. Hukum Kekekalan Momentum, yaitu jumlah momentum sebelum dan sesudah tumbukan adalah sama.
2. Hukum Kekekalan Nomor Atom, yaitu jumlah nomor atom sebelum dan sesudah reaksi sama.
3. Hukum Kekekalan Nomor Massa, yaitu jumlah nomor massa sebelum dan sesudah reaksi sama.
4. Hukum Kekekalan Energi Total, yaitu energi total sebelum dan sesudah reaksi sama.

Partikel proton ($_1^1P$) dan deutron ($_1^2D$) juga digunakan untuk mengganggu kestabilan inti agar inti itu terurai atau berdisintegrasi menjadi inti lain. **Cockroft** dan **Walton** pada 1932 melaporkan hasil reaksi inti ini dengan proton yang dipercepat melalui media listrik dengan persamaan reaksi inti:

$$_1^1\text{H} + {}_3^7\text{Li} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_2^4\text{He}$$

1. Energi yang Dihasilkan dari Reaksi Inti

Reaksi inti dapat dituliskan dalam suatu persamaan

$$X + a \rightarrow Y + b + Q \quad \text{atau} \quad X(a, b)\, Y \qquad (10\text{–}17)$$

Keterangan:

X = inti sasaran
Y = inti baru yang dihasilkan
a = partikel penembak
b = partikel yang dihasilkan
Q = energi yang dihasilkan

Harga Q suatu reaksi inti didefinisikan sebagai perbedaan antara energi diam $X + a$ dan energi diam $Y + b$.

$$Q = [(m_x + m_a) - (m_y + m_b)] \times 931{,}5 \text{ MeV/sma} \qquad (10\text{–}18)$$

Keterangan:

$Q > 0$ reaksi eksotermik, terdapat energi yang dibebaskan
$Q < 0$ reaksi endotermik, terdapat energi yang diserap

Contoh 10.7

Hitunglah harga Q untuk reaksi $n + {}_5^{10}\text{B} \rightarrow {}_3^7\text{Li} + {}_2^4\text{He}$, jika $m_n = 1{,}0087$ sma; $m_B = 10{,}0129$ sma; $m_{Li} = 7{,}0160$ sma; $m_{He} = 4{,}0026$ sma.

Jawab:

$$\begin{aligned} Q &= [(m_x + m_a) - (m_y + m_b)] \times 931{,}5 \text{ MeV/sma} \\ &= [(1{,}0087 + 10{,}0129) - (4{,}0026 + 7{,}0160)] \text{ sma} \times 931{,}5 \text{ MeV/sma} \\ &= (0{,}003 \text{ sma})\ (931{,}5 \text{ MeV/sma}) = 2{,}794 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Contoh 10.8

Jika massa $_1^2\text{H} = 2{,}009$ sma, $_1^3\text{H} = 3{,}016$ sma, $_2^4\text{He} = 4{,}003$ sma, dan $_0^1\text{n} = 1{,}009$ sma. Jika 1 sma = 931 MeV, hitung energi yang dibebaskan pada reaksi

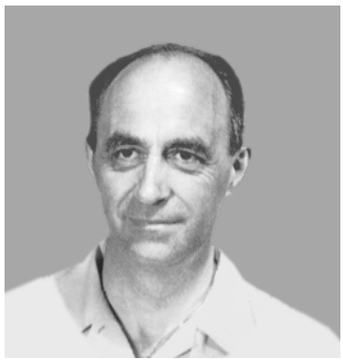
$_1^2\text{He} + {}_1^3\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_0^1\text{n}$.

Jawab:

Energi reaksi sama dengan energi reaktan dikurangi energi produk
Energi reaktan = (2,009 + 3,016) 931 MeV = 4678, 275 MeV
Energi produk = (4, 003 + 1,009) 931 MeV = 4666, 172 MeV
Energi reaksi = 4678,275 – 4666,172 = 12,103 MeV

Tokoh

Enrico Fermi
(1901–1954)



Sumber: *Science Encyclopedia*, 1998

Fermi adalah seorang fisikawan kelahiran Itali. Setelah tahun 1939, ia pergi ke Amerika Serikat untuk bekerja dan hidup disana. Ia dikenal karena menggunakan neutron untuk menembak atom yang dapat menghasilkan isotop. **Enrico Fermi** mendapat hadiah Nobel pada 1938. Pada 2 Desember 1942, reaksi rantai nuklir pertama dihasilkan oleh sebuah tim ilmuwan yang dipimpinnya. Percobaan yang sukses ini bertempat di lapangan Squash Universitas Chicago, Amerika Serikat. Reaksi rantai bekerja menyerupai penyalaan korek api. Panas yang dihasilkan oleh gesekan pada waktu mematik korek api menyebabkan sebagian atom terbakar dan melepaskan lebih banyak panas sehingga menyebabkan reaksi terus-menerus berlangsung.

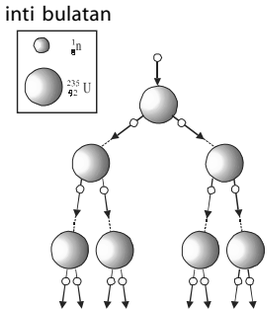
Kata Kunci

- energi reaksi inti
- reaksi eksotermik
- reaksi endotermik
- reaksi berantai
- reaksi fisi
- reaksi fusi

2. Pembuatan Isotop Radioaktif dari Reaksi Inti

Radioaktif dapat diproduksi melalui suatu reaksi inti, proses pembentukan isotop baru yang radioaktif itu dilakukan dengan penembakan isotop yang stabil dengan suatu partikel. Sebagai contoh, isotop radioaktif $^{197}_{79}\text{Au}$,diperoleh dari penembakan isotop stabil $^{196}_{79}\text{Au}$ oleh neutron dengan reaksi $^{1}_{0}\text{n} + {}^{196}_{79}\text{Au} \rightarrow {}^{197}_{79}\text{Au}$.

3. Reaksi Berantai



Gambar 10.19
Diagram reaksi berantai

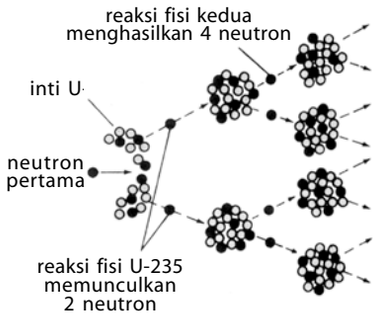
Penembakan neutron pada uranium-235, inti yang terbentuk dari penangkapan neutron tersebut tidak stabil sehingga segera terbelah menjadi inti-inti yang lebih ringan. Hasil pembelahan adalah sebagai berikut.

$$^{1}_{0}\text{n} + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{140}_{54}\text{Xe} + {}^{94}_{38}\text{Sr} + {}^{1}_{0}\text{n} + {}^{1}_{0}\text{n} + Q$$

Isotop $^{140}_{54}\text{Xe}$ dan $^{94}_{38}\text{Sr}$ adalah isotop-isotop yang tidak stabil dengan memancarkan sinar β empat kali berturut-turut, isotop $^{140}_{54}\text{Xe}$ akhirnya berubah menjadi $^{140}_{58}\text{Ce}$ yang stabil. Demikian juga $^{94}_{38}\text{Sr}$ menjadi isotop stabil $^{140}_{54}\text{Xe}$ dengan memancarkan sinar β dua kali berturut-turut. Reaksi yang demikian disebut *reaksi berantai*. Q merupakan energi yang dilepaskan dalam bentuk kalor.

Pada reaktor nuklir, neutron cepat dikendalikan sehingga tidak terlalu banyak neutron yang terlibat dalam reaksi inti. Namun dalam bom atom, neutron cepat ini tidak terkendali sehingga terbentuk ledakan yang sangat dahsyat.

4. Reaksi Fisi



Sumber: *Physics for 'O' Level*, 1990

Gambar 10.20
Pada reaksi pembelahan inti, jumlah neutron bertambah pada setiap tingkatan.

Penemuan reaksi fisi nuklir berawal dari eksperimen interaksi neutron dengan uranium. Tiga kelompok kerja yang berhasil menemukan fisi nuklir adalah **Enrico Fermi**, **Juliet Currie-Savit**, dan **Otta Hahn-Strassman** pada 1939. Mereka mengatakan bahwa penangkapan neutron oleh suatu inti uranium akan memberikan gaya pada energi permukaan sehingga inti akan terbelah dua dengan massa sebanding. Kemungkinan lain inti tereksitasi dan menghasilkan peluruhan gamma. Hal ini disebut *reaksi fisi*. Perhatikan **Gambar 10.20**.

Gambar 10.20 memperlihatkan inti yang terbentuk $\left({}^{236}_{92}\text{U}\right)$ tidak stabil dan segera terbelah menjadi inti-inti lebih ringan yang stabil. Pasangan-pasangan yang terjadi pada fisi $^{236}_{92}\text{U}$ tidak menunjukkan pasangan yang khas, tetapi merupakan satu dari 40 kemungkinan yang terjadi di antaranya.

$$^{236}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{94}_{36}\text{Kr} + {}^{140}_{56}\text{Ba} + 2\left({}^{1}_{0}\text{n}\right)$$

$$^{236}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{95}_{38}\text{Sr} + {}^{139}_{54}\text{Ba} + 2\left({}^{1}_{0}\text{n}\right)$$

$$^{236}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{96}_{40}\text{Zr} + {}^{187}_{52}\text{Te} + 3\left({}^{1}_{0}\text{n}\right), \text{ dan seterusnya.}$$

Pada hampir semua reaksi fisi terjadi pengurangan massa sekitar 8,2 sma, berarti 100× lebih besar daripada massa yang hilang pada semua jenis reaksi peluruhannya, sebagai contoh, fisi ^{235}U dengan neutron lambat menghasilkan inti ^{45}Mo dan ^{139}La. Massa yang hilang dan energi yang dihasilkan dihitung sebagai berikut.

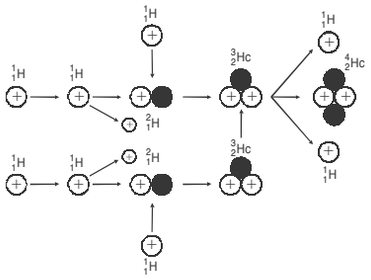
$^{235}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{45}_{40}Mo + {}^{139}_{57}La + 2\left({}^{1}_{0}n\right)$

$\Delta m = (m_u + m_n) - (m_{Mo} + m_{La} + 2m_n)$

$\Delta m = (235{,}0439 + 1{,}0087) - (94{,}905 + 138{,}9061 + 2{,}0174) = 0{,}233$ sma.

Energi fisinya = 931 MeV/sma (Δm)
= (931 MeV/sma) (0,233 sma)
= 208 MeV

Hasil pembelahan inti uranium menghasilkan neutron yang baru (2 sampai 3 neutron), maka akan dapat terjadi proses fisi berantai. Neutron-neutron hasil pembelahan inti akan mengenai U^{-235} yang lain dan menimbulkan reaksi yang sama secara berantai.



Gambar 10.21
Penggabungan empat inti hidrogen membentuk inti helium disertai pelepasan energi.

5. Reaksi Fusi

Reaksi fusi adalah penggabungan dua inti ringan menjadi sebuah inti yang lebih berat disertai dengan pelepasan energi. Energi yang dilepaskan lebih besar dibandingkan energi yang diperlukan untuk menggabungkan kedua inti. Energi fusi yang cukup besar diperoleh dari Matahari dan bintang yang merupakan sumber energi di alam semesta ini.

Reaksi fusi mengubah inti hidrogen menjadi inti helium. Gejala ini terjadi dalam kondisi bintang menurut siklus proton-proton, reaksinya adalah sebagai berikut.

a. Pada tahap awal reaksi, proton bergabung dengan proton membentuk deuterium ${}^{2}_{1}D$.

$${}^{1}_{1}P + {}^{1}_{1}P \rightarrow {}^{2}_{1}D + {}^{0}_{1}\beta + 1{,}42 \text{ MeV}$$

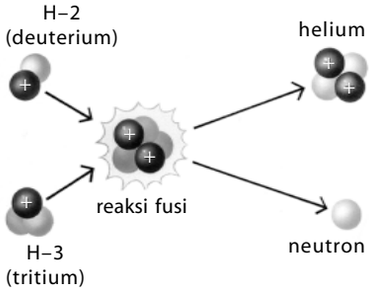
b. Deuterium bergabung dengan proton membentuk inti tritium ${}^{3}_{2}He$.

$${}^{1}_{1}P + {}^{2}_{1}D \rightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{0}_{0}\gamma + 5{,}49 \text{ MeV}$$

c. Inti ${}^{3}_{2}He$ bereaksi menghasilkan ${}^{4}_{2}He$

$${}^{3}_{2}He + {}^{3}_{2}He \rightarrow {}^{4}_{2}\alpha + {}^{1}_{1}P + {}^{1}_{1}P + 12{,}86 \text{ MeV}$$

Reaksi fusi yang terjadi di Matahari adalah reaksi penggabungan hidrogen (${}^{1}_{1}H$) menjadi inti helium (${}^{4}_{2}He$) sambil membebaskan energi yang sangat besar. Reaksi penggabungan inti diperlihatkan pada **Gambar 10.22**.



Gambar 10.22
Reaksi fusi di Matahari

Contoh reaksi fusi yang terjadi di Matahari adalah sebagai berikut.

${}^{1}_{1}H + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{2}_{1}H + {}^{0}_{1}e$ dengan $Q = 3{,}27$ MeV

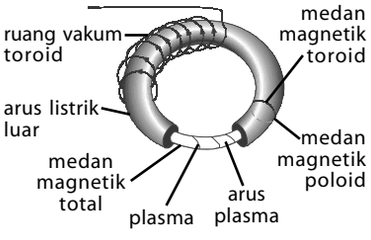
${}^{2}_{1}H + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{0}_{0}\gamma$ dengan $Q = 4{,}03$ MeV

${}^{3}_{2}He + {}^{3}_{2}He \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{1}H + {}^{1}_{1}H$ dengan $Q = 17, 59$ MeV

Contoh lain dari reaksi fusi adalah bom hidrogen. Pada mulanya, bom hidrogen dibuat setara dengan ledakan 10 megaton TNT (kira-kira 700 kali energi bom atom pertama). Bahan baku bom hidrogen adalah inti deuterium dan tritium yang kemudian bergabung membentuk inti helium.

Reaksi fusi yang berlangsung spontan hanya terjadi pada suhu dan tekanan yang sangat tinggi. Cara mengendalikan reaksi fusi tersebut sukar dilakukan karena memerlukan suhu sekitar 10^8K. Pada suhu tersebut semua materi akan berbentuk plasma panas sehingga sangat sukar mencapai partikel *n* yang cukup panas.

Salah satu usaha yang dilakukan untuk memerangkap plasma reaktif dalam medan magnetik dirancang oleh Rusia yang disebut *tokamak* dengan medan magnetik berbentuk kue donat (torus).



Sumber: *Physics for Scientist and Engineers*, 2000

Gambar 10.23
Tokamak

Contoh 10.9

Hitunglah energi (dalam MeV) yang dibebaskan oleh penggabungan dua proton dan dua neutron untuk membentuk sebuah inti helium. (Diketahui massa ${}_1^1\text{H} = 1{,}007825$ sma, ${}_2^4\text{He} = 4{,}002$ sma, ${}_0^1\text{n} = 1{,}008665$ sma, dan 1 sma = 931 MeV)

Jawab:

Persamaan reaksi penggabungan intinya adalah

$2\,{}_1^1\text{H} + 2\,{}_0^1\text{n} \rightarrow {}_2^4\text{He} + \text{energi}$

Energi sebelum reaksi

$[2\,(1{,}007825) + 2\,(1{,}008665)] \times 931\ \text{MeV} = 3754{,}704\ \text{MeV}$

Energi sesudah reaksi

$(4{,}002)\,(931\ \text{MeV}) = 3725{,}862\ \text{MeV}$

Energi reaksi = energi sebelum reaksi – energi sesudah reaksi

$= 3754{,}704 - 3727{,}862 = 28{,}842\ \text{MeV}$

Jadi, energi yang dibebaskan sebesar 28,842 MeV.

Tes Kompetensi Subbab C

Kerjakanlah pada buku latihan.

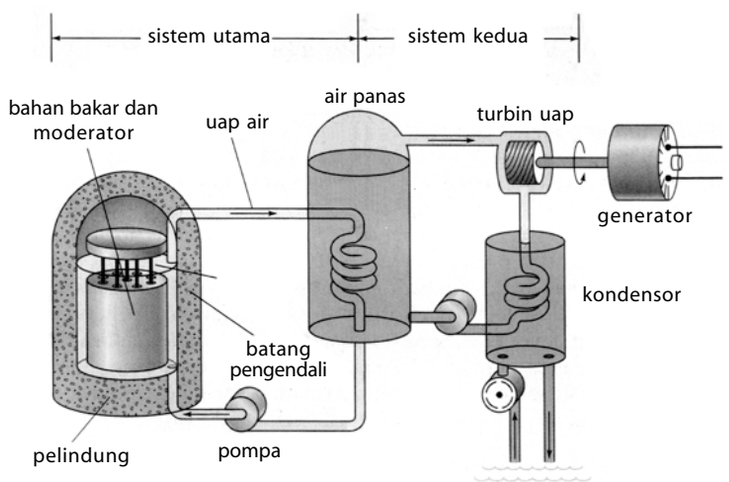
1. Tentukan nama partikel X dari reaksi inti berikut ini.
 a. ${}_3^7\text{Li} + {}_1^1\text{H} \rightarrow 2\text{X}$
 b. ${}_7^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow \text{X} + {}_1^2\text{H}$
 c. ${}_{13}^{27}\text{Al} + \alpha \rightarrow {}_{15}^{30}\text{P} + \text{X}$
 d. ${}_1^1\text{H} + {}_1^2\text{H} \rightarrow {}_2^3\text{He} + \text{X}$
2. Hitung energi yang dibebaskan pada reaksi inti ${}_4^7\text{Be} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_1^1\text{H} + {}_3^7\text{Li} + \text{energi}$, jika diketahui massa ${}_4^7\text{Be} = 7{,}01693$ sma, ${}_3^7\text{Li} = 7{,}0160$ sma, ${}_0^1\text{n} = 1{,}008665$ sma, dan 1 sma = 931 MeV.
3. Tentukan energi yang dilepaskan pada reaksi fisi berikut ini.
 ${}_{92}^{238}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{36}^{83}\text{Kr} + {}_{56}^{137}\text{Ba} + 4\,{}_0^1\text{n} + \text{energi}$
 Jika diketahui: massa ${}_{92}^{238}\text{U} = 238{,}0300$ sma, massa ${}_0^1\text{n} = 1{,}008665$ sma, massa ${}_{36}^{83}\text{Kr} = 83{,}8000$ sma, massa ${}_{56}^{137}\text{Ba} = 137{,}3300$ sma, dan 1 sma = 931 MeV.
4. Untuk reaksi berikut.
 a. ${}_{13}^{27}\text{Al}(\alpha, \text{n})_y^x\text{P}$, tentukan nomor massa x dan y.
 b. $\text{X}(\alpha, \text{P})_6^{13}\text{C}$, tentukan nuklida x.
 c. ${}_{11}^{23}\text{Na}(\alpha, \text{X})_{12}^{26}\text{Mg}$, tentukanlah partikel x.
5. Tentukan energi ikat inti ${}_{14}^{28}\text{Si}$, ${}_6^{12}\text{C}$, ${}_7^{14}\text{N}$ yang massanya berturut-turut adalah 27,98578 sma, 12,00388 sma, dan 14,00753 sma.
6. Pada reaksi inti neutron dengan trition menghasilkan sebuah partikel alfa. Berapa banyaknya energi yang dikeluarkan pada reaksi inti tersebut? Tulis persamaan reaksinya. Massa ${}_3^6\text{Li} = 6{,}01543$ sma dan massa deutron ${}_1^2\text{D} = 2{,}1419$ sma.
7. Perhatikan reaksi inti berikut.
 ${}_1^1\text{H} + {}_3^7\text{Li} \rightarrow 2\left({}_2^4\alpha\right) + \text{Q}$
 Hitung energi yang dihasilkan jika diketahui massa ${}_1^1\text{H} = 1{,}008$ sma, ${}_3^7\text{Li} = 7{,}016$ sma, $2\left({}_2^4\alpha\right) = 4{,}003$ sma dan 1 sma = 931,5 MeV
8. Jawablah pertanyaan berikut.
 a. Bagaimana reaksi fisi dapat dikendalikan? Jelaskan.
 b. Apa yang menyebabkan kerusakan untuk mengadakan suatu reaksi fusi?
 c. Apa yang dimaksud dengan radiasi dan bagaimana radiasi dapat berbahaya serta bermanfaat bagi manusia?

D. Reaktor Nuklir, Bom Nuklir, dan Radioisotop

1. Reaktor nuklir

Reaktor nuklir adalah tempat terjadinya reaksi berantai yang menyangkut fisi nuklir yang terkendali. Reaktor nuklir merupakan sumber energi sangat efisien. Energi yang dilepaskan dalam bentuk kalor dan dapat diambil dengan mengalirkan zat cair atau gas sebagai pendingin melalui bagian-bagian dalam reaktor itu.

Tabung yang biasa dipakai tingginya 10 m, berdiameter dalam 3 m, dan tebal dindingnya 20 cm. **Gambar 10.24** adalah perancangan dasar reaktor nuklir air-tekan. Air berlaku sebagai moderator dan pendingin untuk teras. Dalam reaktor air didih, uap air dibiarkan terjadi didalam tabung reaktor dan kemudian dipakai untuk menggerakkan turbin. Dalam reaktor air tekan, air yang mengalir melewati teras dipertahankan bertekanan tinggi sekitar 150 atm. Air yang masuk ke dalam tabung bertekanan tinggi memiliki suhu 280 °C dan meninggalkannya pada suhu 320 °C, melalui penukar kalor yang menghasilkan uap sehingga dapat memutar sebuah turbin.



Sumber: *Physics for Scientist and Engineers,* 2000

Gambar 10.24
Perancangan dasar reaktor Nuklir air-tekan.

Bahan bakar reaktor air ringan adalah uranium oksida (UO_2) yang tertutup dalam tabung panjang dan sempit. Reaksi dimulai dengan sebuah neutron yang menumbuk inti sehingga menyebabkan pembelahan inti disertai dengan terlepasnya dua atau tiga neutron. Neutron mengalami perlambatan beberapa MeV menjadi energi termal melalui tumbukan dengan inti moderator, kemudian diteruskan dengan fisi. Selanjutnya, laju reaksi berantai dapat dikontrol menggunakan batang kontrol yang terbuat dari kadmium atau boron yang mudah menyerap neutron. Ketika batang ini dimasukkan lebih dalam ke dalam reaktor, laju reaksinya diredam, uap yang keluar dari turbin didinginkan menjadi air oleh kondensor, dan oleh pompa sekunder dimasukkan kembali ke alat penukar panas.

Reaktor nuklir pertama dibangun oleh **Enrico Fermi** (1901–1954) pada 1942 di Universitas Chicago, Amerika Serikat. Sampai saat ini telah dibangun berbagai jenis dan ukuran reaktor nuklir. Reaktor-reaktor nuklir tersebut memiliki beberapa komponen dasar, di antaranya elemen-elemen bahan bakar, batang kendali, moderator, dan perisai (*shielding*). Elemen



Gambar 10.25
Reaktor nuklir dengan moderator air

Informasi untuk Anda

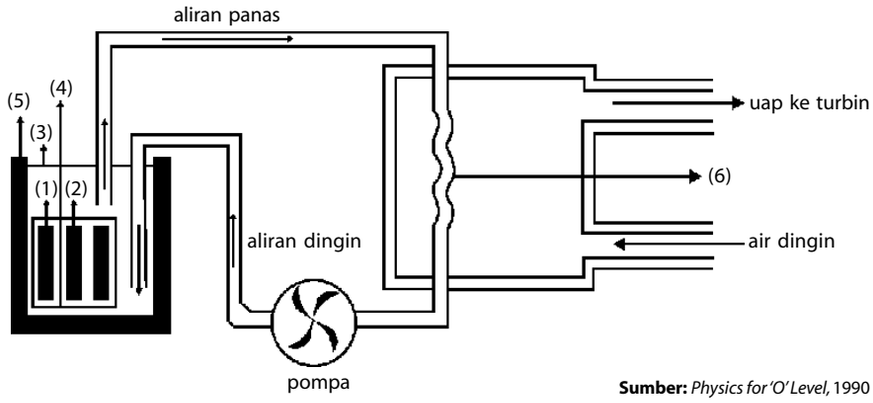
Beberapa jenis limbah reaktor nuklir bersifat radioaktif. Limbah ini menghasilkan radiasi nuklir mematikan yang merusak sel-sel hidup. Beberapa jenis limbah radioaktif dapat bertahan ribuan tahun. Oleh karena itu, limbah yang disimpan rapat dalam peti kemas tertutup harus dipendam di bawah tanah. Untuk menangani limbah nuklir maka orang harus menggunakan pakaian seperti terlihat pada gambar berikut.

Information for You

Some kind of the nuclear reactor waste is radioactive material. This waste produce deadly nuclear radiation that damage living cells. Some kind of radioactive waste can last for thousand years. So, nuclear reactor waste placed in shielded box must be buried underground. Overcoming nuclear waste, people must wear suit like you have seen this picture.



bahan bakar dan batang kendali terletak di dalam suatu tempat yang dinamakan teras reaktor. Komponen-komponen tersebut ditunjukkan pada **Gambar 10.26**.



Gambar 10.26
Komponen-komponen dasar sebuah reaktor atom: (1) teras reaktor; (2) elemen bahan bakar; (3) moderator; (4) batang kendali; (5) *shielding*; (6) pendingin.

Sumber: *Physics for 'O' Level*, 1990

Elemen-elemen bahan bakar reaktor nuklir berbentuk batang-batang tipis. Bahan bakar yang dipakai pada umumnya adalah unsur-unsur yang memiliki sifat dapat bereaksi secara fisi, misalnya $^{235}_{92}U$, $^{238}_{92}U$, dan $^{239}_{94}Pu$.

Moderator berfungsi untuk memperlambat kelajuan neutron-neutron yang dibebaskan selama proses pembelahan inti (fisi) berlangsung. Mengapa laju neutron harus diperlambat? Sebuah inti $^{235}_{92}U$ akan lebih mudah menangkap neutron lambat daripada menangkap neutron cepat. Akan tetapi, neutron-neutron yang dipancarkan selama proses reaksi fisi berlangsung bergerak dengan kelajuan tinggi. Oleh karena itu, diperlukan moderator. Moderator yang paling umum digunakan adalah air berat (D_2O). Salah satu keunggulan moderator air berat adalah dapat berfungsi sebagai pendingin teras reaktor.

Ketika sebuah neutron berenergi tinggi keluar dari sebuah elemen bahan bakar, neutron tersebut memasuki air dan bertumbukan dengan molekul-molekul air. Neutron cepat akan kehilangan sebagian energinya selama menumbuk atom-atom air sehingga laju neutron tersebut menjadi lambat.

Batang kendali berfungsi untuk menyerap kelebihan neutron yang dihasilkan dari reaksi pembelahan inti (fisi) sehingga reaksi fisi berantai yang terjadi di dalam reaktor dapat dikendalikan. Batang kendali biasanya terbuat dari kadmium atau boron.

Batang kendali menjaga agar setiap pembelahan inti hanya menghasilkan satu pembelahan tambahan saja. Jika neutron-neutron dari tiap pembelahan menghasilkan pembelahan tambahan yang lebih besar dari satu pembelahan, batang kendali akan ditekan masuk ke dalam reaktor sehingga kelebihan neutron hasil reaksi diserap oleh batang kendali. Sebaliknya, jika neutron-neutron dari tiap pembelahan, menghasilkan pembelahan tambahan yang lebih kecil dari satu pembelahan, batang kendali sebagian ditarik menjauhi teras reaktor sehingga neutron yang diserap lebih sedikit.

Inti atom hasil pembelahan dapat menghasilkan radiasi. Agar para pekerja di sekitar reaktor dapat bertugas dengan aman dari radiasi ini, dibuat perisai beton untuk menahan radiasi yang dihasilkan selama proses reaksi fisi berlangsung.

Energi yang dihasilkan pada proses reaksi fisi berupa panas. Sistem



Informasi untuk Anda

Sebuah reaktor nuklir tidak dapat meledak seperti bom atom. Akan tetapi, suatu kecelakaan pada pusat tenaga nuklir dapat menimbulkan akibat yang merusak sejumlah besar wilayah sekitarnya. Pada 1986, terjadi kecelakaan nuklir terbesar di pusat tenaga nuklir Chernobyl di Ukraina. Kecelakaan ini melepaskan zat radioaktif ke dalam atmosfer dan mengakibatkan gangguan kesehatan yang hebat pada penduduk di sekitar Chernobyl. Penduduk di Eropa pun mendapatkan dampak yang tidak kecil.

Information for You

A nuclear reactor can not explode like atom bomb. But, an accident in centre of the nuclear power can cause a large destruction. In 1986, the biggest nuclear accident happened in the Chernobyl nuclear power plant, Ukraine. This accident released radioactive material to the atmosphere and caused severe health disorder to civilians near by some European also got the serious effect.

pemindahan panas mutlak diperlukan pada suatu reaktor nuklir. Hal tersebut bertujuan memindahkan panas yang dihasilkan reaksi fisi dari moderator (pendingin primer) ke pendingin sekunder. Pemindahan panas ini sangat penting karena pendingin primer biasanya merupakan suatu rangkaian tertutup. Pendingin dikembalikan lagi ke reaktor setelah panas yang dibawanya dari teras reaktor dipindahkan ke pendingin sekunder.

Berdasarkan kegunaannya, reaktor nuklir dapat dibedakan menjadi

a. Reaktor Daya
 Reaktor daya adalah reaktor yang dapat menghasilkan tenaga listrik. Reaktor daya pada umumnya merupakan reaktor komersial. Misalnya, dimanfaatkan untuk PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir).
b. Reaktor Produksi Isotop
 Reaktor produksi isotop adalah reaktor yang menghasilkan radioisotop yang banyak digunakan dalam bidang kedokteran, industri, biologi, dan farmasi.
c. Reaktor Penelitian
 Reaktor penelitian adalah reaktor yang digunakan untuk penelitian di bidang pertanian, peternakan, industri, kedokteran, dan sains.

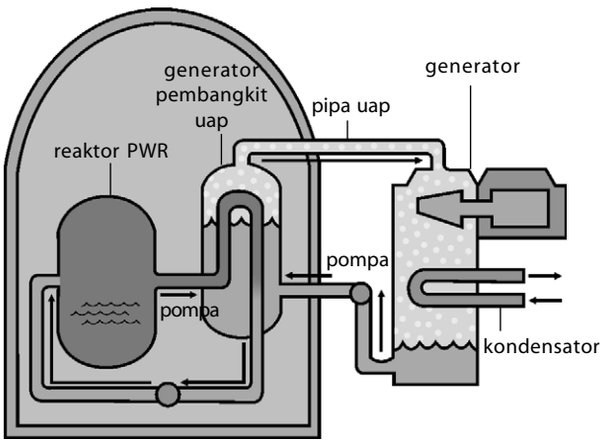
Indonesia memiliki tiga reaktor penelitian dan produksi isotop yang berada di Bandung, Yogyakarta, dan Serpong. Reaktor yang berada di Bandung diberi nama Triga Mark II (*Training, Research, and Isotop Production by General Atomic II*), di Yogyakarta diberi nama reaktor Kartini, sedangkan yang berada di Serpong diberi nama MPR 30 (*Multi Purpose Reactor*) yang memiliki daya 30 Mwatt.

Seperti telah dibahas sebelumnya, salah satu pemanfaatan nuklir adalah untuk PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir).

Berdasarkan jenis pendinginnya, ada dua jenis PLTN, yaitu PLTN dengan sistem PWR (*Pressurized Water Reactor*) dan BWR (*Boiling Water Reactor*).

a. PLTN dengan Sistem PWR

Bagan PLTN dengan sistem PWR ditunjukkan pada **Gambar 10.27**. Air yang mengalir melewati teras reaktor dipertahankan agar bertekanan tinggi ($P > 150$ atm). Hal ini bertujuan mencegah terjadinya penguapan air yang bersuhu 300 °C. Dalam reaktor dengan sistem PWR, panas yang dihasilkan dari reaksi inti diangkut keluar oleh pendingin primer dengan cara dipompa terus-menerus dan dialirkan menuju generator pembangkit uap sehingga pada pembangkit uap dihasilkan uap bertekanan tinggi. Uap bertekanan tinggi ini digunakan untuk memutar turbin yang dikopel dengan generator listrik hingga dihasilkan energi listrik. Setelah keluar dari turbin, uap didinginkan kembali oleh kondensator hingga menjadi air, kemudian dikembalikan lagi untuk mengangkut panas kembali.



Sumber: *Fundamental of Physics,* 2001

Gambar 10.27
Bagan PLTN dengan sistem PWR

b. PLTN dengan Sistem BWR

Pada sistem BWR, tekanan air yang mengalir melewati teras reaktor lebih rendah daripada sistem PWR, yaitu sekitar 70 atm. Air ini diuapkan dalam tabung reaktor dan dialirkan untuk memutar turbin sehingga

Tokoh

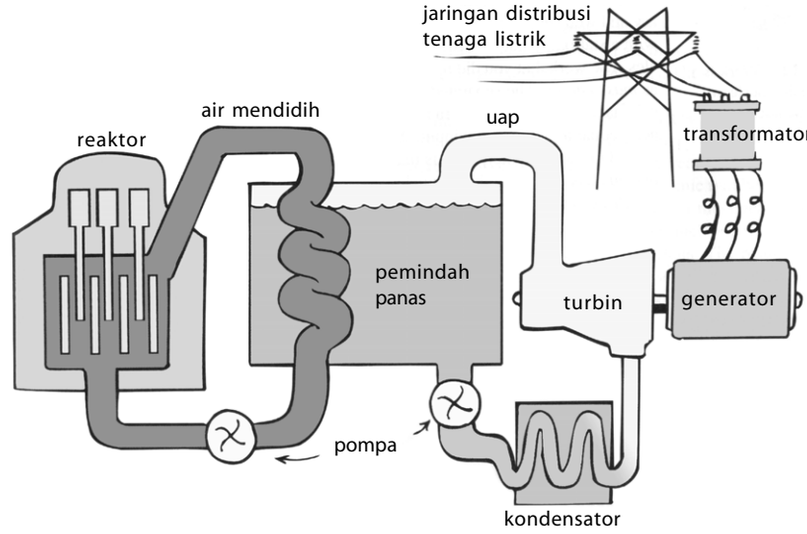
Otto Hann



Sumber: *Science Encyclopedia,* 1998

Otto Hahn lahir di Frankfurt, Jerman. Ia mendapatkan gelar Ph.D dari Universitas Marburg pada 1901. **Hahn** mempelajari beberapa unsur radioaktif, termasuk aktinium dan thorium. Pada 1917, ia dan **Lise Meitner** berbagi penghargaan atas penemuan logam radioaktif yang diberi nama protaktinium. Pada 1944, **Hahn** mendapatkan hadiah Nobel bidang kimia untuk keberhasilannya dalam penemuan pembelahan inti. Proses pembelahan inti itu disebut fisi nuklir. Para ilmuwan di Amerika Serikat menggunakan hasil penemuan **Hahn** ini untuk membuat bom atom pada awal 1940-an. Sejak saat itu penggunaan fisi nuklir untuk tujuan damai pun dikembangkan.

dihasilkan energi listrik. Uap panas yang masuk ke ruang turbin ini dimasukkan ke dalam kondensator sehingga berubah menjadi air, kemudian dipompa kembali memasuki ruang teras reaktor. Bagian PLTN dengan sistem BWR ditunjukkan pada **Gambar 10.28**.



Gambar 10.28
Bagan PLTN dengan sistem BWR

Sumber: *Conceptual Physics*, 1998

2. Bom Nuklir

Anda pasti sudah sering mendengar istilah bom atom atau bom nuklir. Bom nuklir merupakan bom yang menggunakan energi dari tenaga nuklir. Bom nuklir terdiri atas dua macam, yaitu bom fisi nuklir dan bom fusi nuklir.

Bom fisi nuklir memanfaatkan energi sangat besar yang dilepaskan sesudah reaksi pembelahan inti. Bahan bakar yang digunakan adalah uranium U-235 atau plutonium Pu-239. Uranium dapat ditemukan di alam, tetapi plutonium hanya dapat diperoleh dari reaksi fisi di teras reaktor nuklir.

Prinsip kerja bom fisi hampir sama dengan PLTN. Bahan bakar berupa U-235 atau Pu-239 membelah menjadi beberapa inti, beberapa neutron, dan sejumlah energi. Agar reaksi pembelahannya tidak terkendali, bahan bakar tersebut harus berada dalam massa kritis yaitu massa minimum yang menyebabkan reaksi tak terkendali. Jika massa bahan bakar dibawah massa kritis, jumlah neutron yang bocor lebih banyak dari neutron yang membelah. Adapun dalam massa kritis, reaksi pembelahan dapat terjadi secara serentak. Artinya, waktu jeda antar reaksi hanya berorde mikrodetik atau milidetik. Akibat reaksi pembelahan yang serentak ini, energi yang dilepaskan dapat terakumulasi.

Ketika terjadi ledakan, sebagian besar energi yang dihasilkan berupa energi kinetik. Selain itu, dihasilkan juga radiasi panas, kilatan cahaya dan emisi radioaktif. Fakta tentang dahsyatnya kekuatan bom fisi nuklir ini terlihat jelas di kota Hirosima dan Nagasaki, Jepang.

3. Radioisotop

a. Pembuatan Radioisotop

Radioisotop adalah isotop-isotop yang tidak stabil. Isotop yang tidak stabil selalu memancarkan sinar-sinar radioaktif untuk menjadi isotop-isotop stabil. Pada umumnya, radioaktif yang digunakan dalam berbagai

Tantangan untuk Anda

Mengapa molekul dari uranium (U–235) lebih cepat bergerak daripada molekul U–238 pada suhu yang sama?

Kata Kunci

- reaktor nuklir
- reaktor daya
- reaktor produksi isotop
- reaktor penelitian
- sistem PWR
- sistem BWR

Tugas Anda 10.2

Apakah Anda pernah mendengar tragedi Chernobyl? Chernobyl merupakan pembangkit listrik tenaga nuklir di Ukraina yang mengalami kebocoran. Carilah informasi dari berbagai sumber, mengapa kebocoran ini bisa terjadi?

keperluan tidak tersedia di alam karena waktu paruh dari nuklida aktif suatu radioaktif tidak terlalu lama. Oleh karena itu, radioisotop tersebut harus dibuat dari nuklida stabil alamiah dengan reaksi inti. Cara yang banyak dipakai adalah dengan menembak inti stabil dengan partikel neutron. Contoh radioisotop buatan Pusat Penelitan Tenaga Nuklir (PPTN) adalah ^{24}Na, ^{32}P, ^{51}Cr, ^{99}Tc, dan ^{131}I.

b. Penggunaan Radioisotop

Penggunaan radioisotop antara lain sebagai berikut.

1) Dalam bidang pertanian

Di Indonesia, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) sebagai lembaga penelitian telah melakukan penelitian dalam bidang pertanian dengan teknologi mutasi radiasi. Mutasi radiasi digunakan untuk mendapatkan tanaman dengan varietas baru yang unggul.

2) Dalam bidang industri

Dalam bidang industri, radioisotop digunakan untuk mengukur ketebalan material yang dihasilkan oleh suatu pabrik. Misalnya, radiasi sinar beta digunakan untuk mengatur ketebalan kertas di pabrik kertas dan sinar gamma digunakan untuk mengatur ketebalan baja.

Di Indonesia, radioisotop telah digunakan dalam teknik polimerisasi radiasi. Misalnya, dalam vulkanisasi lateks alam dan pelapisan permukaan kayu.

3) Dalam bidang hidrologi

Dalam bidang hidrologi, radioisotop digunakan untuk mengukur laju aliran atau debit aliran fluida dalam pipa, saluran terbuka, sungai, serta air dalam tanah. Radioisotop dapat juga digunakan untuk mendeteksi kebocoran pipa penyalur yang ditanam di dalam tanah.

4) Dalam bidang kedokteran

Cabang ilmu kedokteran yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik pendek, seperti sinar-*X* disebut radiologi. Radiologi dimanfaatkan untuk menunjang diagnosis penyakit.

Dalam dunia kedokteran nuklir, prinsip radiologi dimanfaatkan dengan memakai isotop radioaktif yang disuntikkan ke dalam tubuh. Kemudian, isotop tersebut ditangkap oleh detektor di luar tubuh sehingga diperoleh gambaran yang menunjukkan distribusinya di dalam tubuh. Sebagai contoh, untuk mengetahui letak penyempitan pembuluh darah pada penderita penyakit penyempitan pembuluh darah, digunakan radioisotop natrium. Kemudian, jejak radioaktif tersebut dirunut dengan menggunakan pencacah Geiger. Letak penyempitan pembuluh darah ditunjukkan dengan terhentinya aliran natrium.

Selain digunakan untuk mendiagnosis penyakit, radioisotop juga digunakan untuk terapi radiasi. Terapi radiasi adalah cara pengobatan dengan memakai radiasi. Terapi seperti ini biasanya digunakan dalam pengobatan kanker. Pemberian terapi dapat menyembuhkan, mengurangi gejala, atau mencegah penyebaran kanker, bergantung pada jenis dan stadium kanker.

5) Dalam bidang paleotografi

Selain dalam bidang-bidang yang telah disebutkan di atas, radioisotop juga digunakan untuk menentukan umur batuan, fosil, dan benda-benda purbakala. Penentuan umur memiliki peranan penting antara lain untuk mengetahui umur fosil dari masa ribuan tahun yang lalu. Untuk menentukan umur fosil digunakan radioisotop karbon-14 (C-14) yang biasa disebut radiokarbon.



Informasi untuk Anda



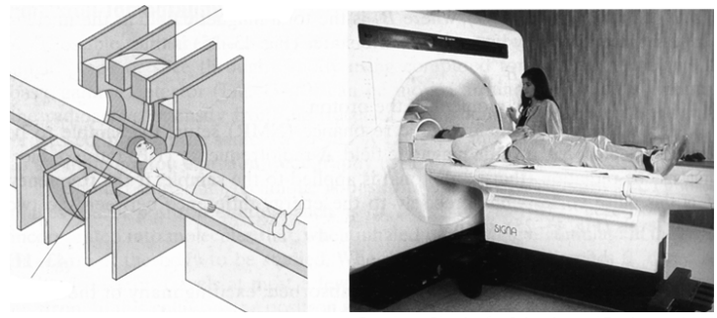
Kedua tangan ini memegang sebongkah uranium–235. Isotop dari uranium yang digunakan sebagai bahan dalam reaktor nuklir. Uranium merupakan salah satu logam berat, sebongkah kecil uranium ini massanya 4,5 kg dan harganya lebih dari 200.000 dolar. Sebelum memegang uranium, tangan harus dilindungi dengan sarung tangan khusus.

Information for You

This two hand hold a slab of Uranium-235. It is uranium isotop used as material in nuclear reactor. Uranium is one of the heavy metal, that small uranium slab weights 4,5 kg and the price is more than 200.000 dollars. Before holding uranium, hands must be covered by a special handgloves.

Tugas Anda 10.3

Carilah foto-foto tentang kondisi kota dan warga Hiroshima dan Nagasaki setelah pengeboman oleh Amerika Serikat. **Diskusikanlah** bersama teman sekelas Anda tentang dampak negatif bom atom. **Diskusikan** juga apakah ada dampak positif dari bom atom.



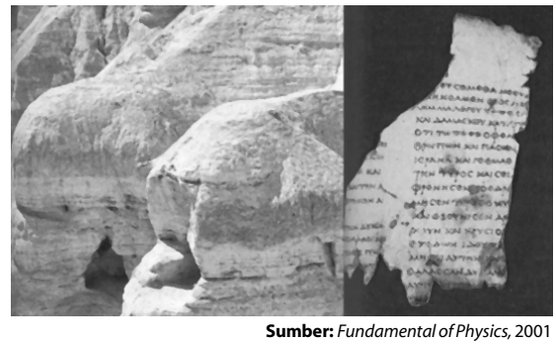
Gambar 10.29
Magnetic Resonance Imaging

Sumber: *Physics for Scientist and Engineers,* 2000

Isotop karbon alamiah hanya memiliki nomor massa atom 12, tetapi radiokarbon memiliki nomor massa 14. Isotop ini terbentuk di alam pada lapisan atmosfer Bumi bagian atas. Sinar kosmik dari angkasa luar menabrak atom-atom di atmosfer bagian atas. Akibatnya, akan terbebaskan elektron, proton, neutron, dan partikel lain. Jika atom nitrogen menangkap neutron itu, atom nitrogen akan berubah menjadi atom C-14 sambil melepaskan proton. Radiokarbon ini berada di atmosfer sebagai karbon dioksida. Fotosintesis menyebabkan C-14 masuk ke dalam tumbuhan sehingga pada akhirnya seluruh makhluk hidup akan mengandung radiokarbon. Selain terus-menerus terbentuk, C-14 juga akan terus-menerus menghilang karena meluruh.

Dalam makhluk hidup yang sudah mati, kadar radiokarbon akan berkurang terus karena meluruh. Setiap 5.700 tahun atom-atom radiokarbon itu tinggal separuh. Kenyataan ini merupakan dasar penetapan umur fosil yang pertama kali dikembangkan oleh **Willard F. Libby** pada 1949-an.

Contoh penanggalan dengan menggunakan isotop karbon adalah penanggalan usia sebuah gulungan perkamen yang ditemukan di sebuah gua di Laut Mati.



Gambar 10.30
Karbon dapat digunakan untuk menentukan usia sebuah gulungan perkamen yang ditemukan di sebuah gua di Laut Mati.

Sumber: *Fundamental of Physics,* 2001

Mari Mencari Tahu

Pernahkah Anda mendengar atau membaca tentang *Nuclear Non-Poliferation Treatment*? Itu adalah perjanjian tentang pembatasan penyebaran dan pengurangan bom nuklir di dunia. Carilah informasi dari berbagai sumber tentang perjanjian tersebut. Negara mana sajakah yang termasuk negara berkekuatan nuklir? Buatlah tulisan dari informasi yang Anda dapatkan. Kumpulkan tulisan tersebut kepada guru Anda. Tulisan yang paling bagus akan dipresentasikan oleh siswa yang bersangkutan di depan kelas.

Tantangan untuk Anda

Apakah radioisotop yang disuntikkan ke dalam tubuh pasien untuk mendiagnosis penyakit, membahayakan pasien itu sendiri?

Tes Kompetensi Subbab D

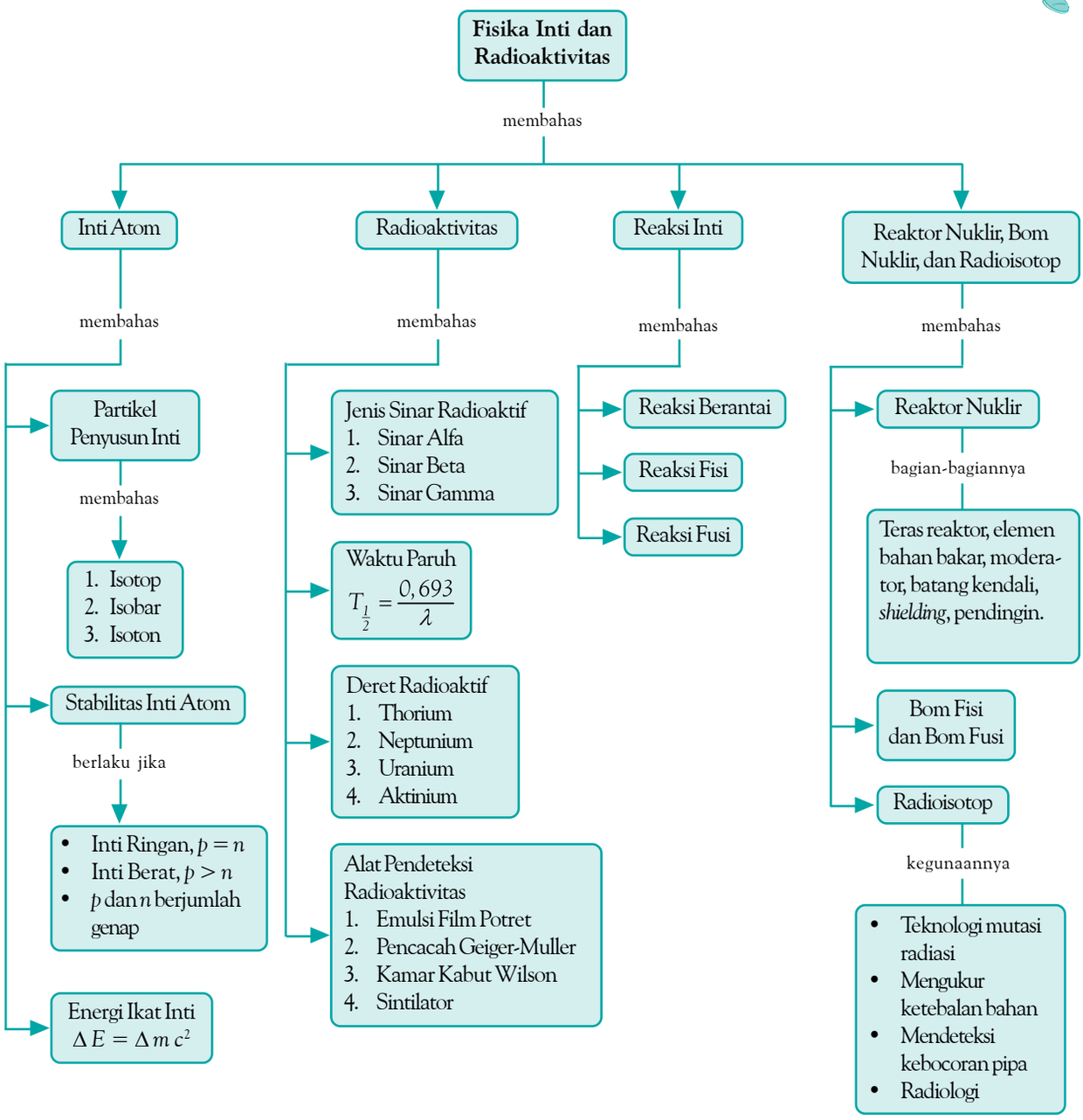
Kerjakanlah pada buku latihan.

1. Sebutkan bagian-bagian utama dari sebuah reaktor nuklir.
2. Jelaskan fungsi dari
 a. moderator;
 b. batang kendali;
 c. perisai.
3. Sebutkan jenis-jenis reaktor berdasarkan kegunaannya.
4. Jelaskan proses perubahan energi pada PLTN dengan sistem PWR sampai dihasilkannya energi listrik.
5. Jelaskan penggunaan radioisotop dalam bidang kedokteran.

Rangkuman

1. Inti atom terdiri atas proton dan neutron. Kedua partikel penyusun inti ini disebut nukleon. Proton bermuatan positif, sedangkan neutron tidak bermuatan listrik.
2. Untuk memberikan spesifikasi terhadap komposisi inti digunakan istilah nuklida yang dinyatakan dengan notasi ${}^{A}_{Z}X$, dengan X = jenis unsur; A = nomor massa; Z = nomor atom; N = jumlah neutron (A– Z).
3. Proses hilangnya sebagian massa neutron menjadi energi ikat inti disebut defek massa. Proses ini terjadi pada pembentukan semua nuklida.
4. Energi ikat inti belum dapat menggambarkan kestabilan nuklida, kestabilan nuklida dipengaruhi oleh energi ikat rata-rata per nukleon.
5. Terdapat tiga macam pemancaran dari unsur radium, yaitu pemancaran alfa, pemancaran beta, dan pemancaran gamma.
6. Waktu penuh $\left(T_{\frac{1}{2}}\right)$, adalah waktu yang dibutuhkan sejumlah unsur radioaktif untuk meluruh menjadi setengah jumlah semula.
7. Dalam reaksi inti berlaku Hukum Kekekalan Nomor Atom dan Nomor Massa serta Hukum Kekekalan Energi dan Momentum.
8. Reaksi fusi adalah bergabungnya dua inti ringan membentuk sebuah inti lebih berat sambil membebaskan energi sangat besar.
9. Reaksi fisi adalah reaksi pembelahan suatu inti berat ketika ditembaki oleh partikel berenergi tinggi yang keluar dari sinklotron atau ketika menyerap neutron lambat.
10. Reaktor nuklir adalah tempat terjadinya reaksi berantai yang mengangkut fisi nuklir yang terkendali. Komponen dasar reaktor nuklir adalah teras reaktor, elemen bahan bakar, moderator, batang kendali, *shielding*, dan pendingin.
11. Bom nuklir terdiri atas dua macam, yaitu bom fisi nuklir dan bom fusi nuklir. Bom fusi nuklir memanfaatkan energi sangat besar yang dilepaskan sesudah reaksi pembelahan inti. Fakta kedahsyatannya terlihat di kota Hiroshima dan Nagasaki, Jepang.
12. Radioisotop adalah isotop-isotop yang tidak stabil. Radioisotop digunakan dalam teknologi mutasi radiasi, teknik polimerisasi radiasi, teknologi pendeteksi kebocoran, teknologi radiologi, teknologi penentu umur suatu bahan, dan lain-lain.

Peta Konsep



Refleksi

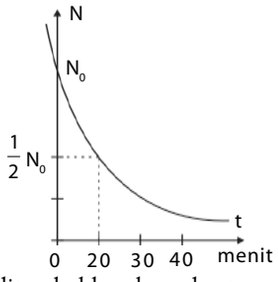
Setelah mempelajari bab ini, tentu Anda telah memahami bagian-bagian penyusunan inti dan bagaimana pengaruh rekayasa penyusun inti tersebut. Anda juga tentu telah memahami mengenai radioaktivitas dan peluruhan serta perhitungan-perhitungan yang ada di dalamnya. Dari keseluruhan materi yang ada pada bab ini, bagian mana yang menurut Anda sulit dipahami? Coba Anda diskusikan dengan teman atau guru Fisika Anda.

Banyak sekali manfaat mempelajari Fisika Inti dan Radioaktivitas. Salah satunya adalah dibangunnya PLTN yang hemat bahan bakar. Coba Anda cari manfaat lain mempelajari bab ini. Diskusikan hasilnya bersama teman-teman Anda.

Tes Kompetensi Bab 10

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling benar.

1. Sebuah atom $^{238}_{92}U$ memiliki
 a. 92 elektron, 92 proton, dan 146 neutron
 b. 92 elektron, 146 proton, dan 92 neutron
 c. 146 elektron, 92 proton, dan 92 neutron
 d. 238 elektron, 146 proton, dan 92 neutron
 e. 238 elektron, 238 proton, dan 92 neutron
2. Hasil suatu peluruhan inti radioaktif adalah sinar alfa, sinar gamma, dan inti $^{222}_{86}Rn$. Inti induknya adalah
 a. $^{224}_{86}Po$
 b. $^{226}_{88}Ra$
 c. $^{228}_{88}Rn$
 d. $^{224}_{87}Fr$
 e. $^{226}_{89}Ac$
3. Sesudah 2 jam, seperenambelas bagian suatu unsur radioaktif masih bersifat radioaktif. Waktu paruh unsur tersebut adalah
 a. 15 menit
 b. 30 menit
 c. 45 menit
 d. 60 menit
 e. 120 menit
4. Dalam reaksi inti atom tidak berlaku
 a. Hukum Kekekalan Energi
 b. Hukum Kekekalan Massa Atom
 c. Hukum Kekekalan Momentum
 d. Hukum Kekekalan Nomor Atom
 e. Hukum Kekekalan Energi Kinetik
5. $^{238}_{92}U$ meluruh menjadi isotop timbal $^{206}_{82}Pb$ oleh emisi 8 partikel alfa dan oleh emisi elektron sebanyak
 a. 6
 b. 5
 c. 4
 d. 3
 e. 2
6. Dari proses-proses berikut, yang merupakan contoh dari peristiwa fusi adalah
 a. pembentukan helium dari hidrogen
 b. pembentukan air dari hidrogen dan oksigen
 c. pembentukan barium dari kripton dan uranium
 d. pembentukan timbal dari radium oleh peluruhan radioaktif
 e. pembentukan oksigen dari natrium yang ditembak dengan partikel alfa
7. Berdasarkan grafik peluruhan berikut ini, maka jumlah zat radioktif setelah 1 jam adalah
 a. $\frac{1}{4}N_0$
 b. $\frac{1}{8}N_0$
 c. $\frac{1}{6}N_0$
 d. $\frac{1}{32}N_0$
 e. $\frac{1}{64}N_0$



8. Pada saat peluru $^{4}_{2}\alpha$ ditembakkan kepada atom $^{14}_{7}N$ dihasilkan proton dengan reaksi:
 $^{4+}_{2}\alpha + {}^{14}_{7}N \rightarrow {}^{1}_{1}F + X$
 Jumlah proton dan neutron dalam atom X masing-masing adalah
 a. 7 dan 9
 b. 8 dan 7
 c. 8 dan 9
 d. 9 dan 7
 e. 9 dan 9
9. Suatu proses fisi $^{235}_{92}U$ mengikuti persamaan
 $^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow Ba + Kr + 3^{1}_{0}n$
 Jika pada proses fisi ini dibebaskan energi 200 MeV, massa neutron = 1,009 sma, massa inti $^{235}_{92}U$ = 235,04, dan 1 sma = 931 MeV maka massa inti (Ba + Kr) adalah
 a. 231,80 sma
 b. 232,80 sma
 c. 233,89 sma
 d. 234,03 sma
 e. 234,89 sma
10. Massa inti $^{7}_{3}Li$ adalah 7,016004 sma. Jika massa proton $[m_p]$ = 1,007825 sma, massa neutron $[m_n]$ = 1,008665 sma, dan 1 sma = 931 = MeV, energi ikat inti $^{7}_{3}Li$ adalah
 a. 25 MeV
 b. 30 MeV
 c. 39 MeV
 d. 45 MeV
 e. 49 MeV
11. Urutan daya tembus sinar-sinar radioaktif dimulai dari yang paling kuat adalah
 a. alfa, beta, dan gamma
 b. gamma, alfa, dan beta
 c. beta, alfa, dan gamma
 d. alfa, gamma, dan beta
 e. gamma, beta, dan alfa
12. Aktivitas isotop radioaktif yang baru ditemukan berkurang menjadi 4% dari harga awalnya dalam selang waktu 200 jam. Waktu paruh isotop itu adalah
 a. 10,2 jam
 b. 34,0 jam
 c. 43,0 jam
 d. 52,4 jam
 e. 68,6 jam
13. Suatu unsur radioaktif meluruh dan tinggal 25% jumlahnya setelah 20 menit. Jika mula-mula massa unsur tersebut 120 gram, setelah setengah jam meluruh massa unsur yang belum meluruh tinggal
 a. 60 gram
 b. 40 gram
 c. 30 gram
 d. 15 gram
 e. 10 gram

(UMPTN 2001 Rayon B)

14. Suatu bahan radioaktif Cesium-137 pada awalnya memiliki laju radiasi foton gamma sebesar $1,5 \times 10^{14}$ partikel tiap detik. Apabila waktu paruh bahan tersebut 30 tahun, laju radiasinya pada 10 tahun berikutnya adalah
 a. $1,67 \times 10^{14}$ partikel/detik
 b. $1,5 \times 10^{14}$ partikel/detik
 c. $1,2 \times 10^{14}$ partikel/detik
 d. $0,75 \times 10^{14}$ partikel/detik
 e. $0,5 \times 10^{14}$ partikel/detik

15. Dalam waktu 48 hari $\frac{63}{64}$ bagian suatu unsur radioaktif meluruh. Waktu paruh unsur radioaktif tersebut adalah (dalam hari)
a. 6 d. 32
b. 16 e. 36
c. 24

(UMPTN 1996)

16. Suatu peluruhan inti menghasilkan zarah-zarah dengan massa m_1 dan m_2 yang bergerak saling menjauhi satu sama lain. Jika E adalah energi kinetik total kedua massa, energi kinetik zarah (anggaplah bahwa inti induknya stasioner sebelum meluruh) bernilai
a. $\frac{m_1}{m_2}E$ d. $\frac{m_2}{(m_1+m_2)}E$
b. $\frac{E}{(m_1+m_2)}$ e. $\frac{m_1}{(m_1+m_2)}E$
c. $\frac{m_2}{m_1}E$

(UM UGM 2004)

17. Suatu partikel pion (meson π^0) dalam keadaan tertentu dapat musnah menghasilkan dua foton identik dengan panjang gelombang λ. Jika massa partikel pion adalah m, h tetapan Planck, dan c kelajuan cahaya dalam vakum, λ dapat dinyatakan dalam m, c, dan h dalam bentuk
a. $\frac{h}{(2mc)}$ d. $\frac{1}{(2mch)}$
b. $\frac{h}{(mc^2)}$ e. $\frac{h}{(mc)}$
c. $\frac{2h}{(mc)}$

18. Suatu zat dengan nomor atom 84 meluruh secara radioaktif menjadi atom lain dengan nomor atom 83. Radiasi yang menyertai proses ini adalah
a. hanya partikel alfa
b. hanya partikel beta
c. partikel beta dan sinar gamma
d. partikel alfa dan sinar gamma
e. partikel alfa, partikel beta, dan sinar gamma

19. Pada proses peluruhan $^{215}_{83}\text{Bi}$ menjadi $^{215}_{84}\text{Po}$ terjadi pelepasan
a. positron d. proton
b. partikel α e. elektron
c. neutron

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan tepat.

1. Bagaimana cara Henri Becquerel mengetahui bahwa sinar yang dipancarkan uranium bukan gejala fosforesensi atau fluoresensi?
2. Apakah yang disebut dengan keaktifan suatu unsur radioaktif?
3. Apa yang dimaksud dengan energi ikat inti?
4. Apa yang membedakan reaksi fisi berantai yang terkendali dengan reaksi fisi berantai yang tak terkendali?

20. Dari reaksi fusi berikut:
$^{2}_{1}\text{H} + {}^{3}_{1}\text{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\text{He} + {}^{1}_{0}\text{n} + \text{Q}$
Jika massa:
$^{2}_{1}\text{H} = 2{,}04741$ u; $^{4}_{1}\text{He} = 4{,}003879$ u;
$^{3}_{1}\text{H} = 3{,}016977$ u; $^{4}_{1}\text{He} = 1{,}008987$ u;
dan 1 u = 931 MeV, energi yang dibebaskan pada reaksi inti tersebut adalah
a. 174,6 MeV d. 0,01746 MeV
b. 17,46 MeV e. 0,001746 MeV
c. 1,746 MeV

21. Reaktor nuklir memiliki beberapa komponen dasar. Berikut ini yang bukan merupakan komponen-komponen dasar sebuah reaktor atom adalah
a. perisai d. batang kendali
b. moderator e. elemen bahan bakar
c. radioisotop

22. Dari ketiga reaktor: A = reaktor Triga Mark II, B = reaktor Kartini, dan C = reaktor serba guna (MPR 30), yang juga berfungsi sebagai reaktor penelitian (*research reactor*) adalah
a. A dan B d. A,B, dan C
b. B dan C e. B saja
c. C dan A

23. Fungsi batang kendali pada reaktor nuklir adalah untuk
a. menurunkan energi neutron
b. menahan radiasi neutron yang dihasilkan
c. memperbesar jumlah neutron
d. menyerap neutron yang berlebihan
e. melepas neutron yang stabil

24. Waktu paruh unsur radon adalah 3,82 hari. Waktu yang diperlukan agar unsur radon tersebut meluruh menjadi $\frac{1}{16}$ dari keadaan semula adalah
a. $1{,}32 \times 10^6$ s d. 15,28 hari
b. 13,2 hari e. 152,8 hari
c. $1{,}32 \times 10^6$ s

25. Reaksi inti berikut yang menghasilkan radioisotop dari bahan yang direaksikan adalah
a. $^{12}_{6}\text{C} + {}^{12}_{6}\text{C} \rightarrow {}^{20}_{10}\text{Ne} + {}^{4}_{2}\text{He}$
b. $^{9}_{4}\text{Be} + {}^{4}_{2}\text{He} \rightarrow {}^{12}_{6}\text{C} + {}^{1}_{0}\text{n}$
c. $^{27}_{13}\text{Al} + {}^{4}_{2}\text{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + {}^{1}_{0}\text{n}$
d. $^{14}_{7}\text{N} + {}^{4}_{2}\text{He} \rightarrow {}^{16}_{8}\text{O} + {}^{2}_{1}\text{H}$
e. $^{23}_{11}\text{Na} + {}^{1}_{0}\text{n} \rightarrow {}^{24}_{11}\text{Na}$

5. Reaktor atom jenis MPR 30 dalam selang waktu tertentu menghasilkan energi sejumlah 6×10^4 kWh. Hitunglah berapa jam reaktor tersebut bekerja.
6. Suatu inti $^{235}_{95}\text{U}$ menangkap sebuahy atom neutron yang sedang bergerak lambat dan terbelah menjadi inti barium $^{141}_{56}\text{Ba}$ dan kripton $^{92}_{36}\text{Kr}$ sambil memancarkan beberapa buah partikel, tentukan nama partikel yang dipancarkan dan jumlah partikel yang dipancarkan.

Proyek Semester 2

Seperti pada akhir semester ganjil yang lalu, pada akhir semester genap ini juga Anda akan mendapatkan tugas kegiatan semester. Kegiatan semester ini diberikan agar Anda lebih memahami konsep yang telah dipelajari pada Bab 10 tentang Fisika Inti dan Radioaktivitas.

Dalam satu kelas bentuklah tiga kelompok kerja. Tiap kelompok ditugaskan untuk membahas kajian yang berbeda dengan tema umum yang digunakan sama, yaitu tentang Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).

Kajian khusus untuk tiap kelompok adalah:

1. Sejarah PLTN mulai dari menemuannya sampai dibangunnya PLTN di Indonesia.
2. Jenis-jenis PLTN dan proses reaksi nuklirnya.
3. Keuntungan dan kerugian dibangunnya PLTN.

Informasi untuk tugas ini dapat Anda cari melalui buku referensi, situs internet, dan wawancara ke narasumber (guru atau ahli di bidang tersebut). Kemudian, susunlah informasi yang diperoleh ke dalam bentuk makalah. Presentasikan makalah kelompok Anda di hadapan kelompok lain dan guru Fisika Anda.

Berikut ini informasi yang dapat Anda kembangkan menjadi sebuah makalah.

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir

PLTN adalah stasiun pembangkit listrik termal di mana panas yang dihasilkan diperoleh dari satu atau lebih reaktor nuklir pembangkit listrik.

Hingga tahun 2005 terdapat 443 PLTN berlisensi di dunia dengan 441 di antaranya beroperasi di 31 negara yang berbeda. Keseluruhan reaktor tersebut menyuplai 17% daya listrik dunia.

Reaktor nuklir yang pertama kali membangkitkan listrik adalah stasiun pembangkit percobaan EBR-I pada 20 Desember 1951, di dekat Arco, Idaho, Amerika Serikat. Pada 27 Juni 1954, PLTN pertama dunia yang menghasilkan listrik untuk jaringan listrik mulai beroperasi di Obninsk, Uni Sovyet. PLTN skala komersil pertama adalah Calder Hall di Inggris yang dibuka pada 17 Oktober 1956.

PLTN dikelompokkan berdasarkan jenis reaktor yang digunakan. Akan tetapi, ada juga PLTN yang menerapkan unit-unit independen dan hal ini bisa menggunakan jenis reaktor yang berbeda.

1. Reaktor Fisi

Reaktor daya fisi membangkitkan panas melalui reaksi fisi nuklir dari isotop uranium dan plutonium. Selanjutnya, reaktor daya fisi dikelompokkan menjadi reaktor termal, reaktor cepat, dan reaktor subkritis.

2. Reaktor Fusi

Fusi nuklir menawarkan kemungkinan pelepasan energi yang besar dengan hanya sedikit limbah radioaktif yang dihasilkan serta dengan tingkat keamanan yang lebih baik. Namun, saat ini masih terdapat kendala-kendala bidang keilmuan, teknik, dan ekonomi yang menghambat penggunaan energi fusi guna pembangkitan listrik.

Keuntungan PLTN dibandingkan dengan pembangkit daya utama lainnya adalah tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca, tidak mencemari udara, sedikit menghasilkan limbah padat, biaya bahan bakar rendah, ketersediaan bahan bakar yang melimpah, dan baterai nuklir. Adapun masalah yang bisa timbul dengan penggunaan PLTN adalah timbulnya risiko kecelakaan nuklir dan limbah nuklir.

Tes Kompetensi Fisika
Semester 2

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan.

1. Kuanta energi yang terkandung di dalam sinar ultra ungu yang panjang gelombangnya 3.300 Å. Konstanta Planck = $6{,}6 \times 10^{-35}$ Js dan kecepatan cahaya = 3×10^8 m/s adalah
 a. $2{,}0 \times 10^{-19}$ J
 b. $3{,}0 \times 10^{-19}$ J
 c. $3{,}3 \times 10^{-19}$ J
 d. $6{,}0 \times 10^{-19}$ J
 e. $6{,}6 \times 10^{-19}$ J
2. Berikut ini yang fotonnya memiliki energi terbesar adalah
 a. sinar merah
 b. sinar ungu
 c. sinar gamma
 d. sinar-X
 e. gelombang radio
3. Panjang gelombang yang harus dimiliki radiasi elektromagnetik jika sebuah foton dalam berkas itu harus memiliki momentum yang sama dengan momentum elektron yang bergerak dengan kecepatan 2×10^5 m/s adalah
 ($h = 6{,}6 \times 10^{-34}$ Js; $m_e = 9{,}1 \times 10^{-31}$ kg)
 a. 36,4 mm
 b. 3,64 m
 c. 0,364 nm
 d. 3,64 nm
 e. 36,4 nm
4. Pernyataan yang benar tentang peristiwa fotolistrik adalah
 a. seluruh energi foton diberikan pada elektron dan digunakan sebagai energi kinetik elektron
 b. seluruh energi foton diberikan pada elektron dan digunakan untuk melepaskan diri dari logam
 c. foton lenyap dan seluruh energinya diberikan pada elektron
 d. makin besar intensitas foton, makin besar energi kinetik elektron
 e. kecepatan elektron yang lepas dari logam adalah nol jika energi foton lebih kecil dari fungsi kerja logam
5. Permukaan logam tertentu memiliki fungsi kerja W joule. Jika Konstanta planck h joule sekon, energi maksimum foto elektron yang dihasilkan oleh cahaya berfrekuensi v Hz adalah (dalam J)
 a. $W + hv$
 b. $\frac{W}{hv}$
 c. $W - hv$
 d. $\frac{hv}{W}$
 e. $hv - W$

 (UMPTN 1997 Rayon A)
6. Sebuah partikel yang memiliki massa m bergerak dengan kecepatan v. Jika tetapan Planck h, panjang gelombang partikel adalah
 a. $\frac{m}{hv}$
 b. $\frac{hv}{m}$
 c. $\frac{hm}{v}$
 d. mhv
 e. $\frac{h}{mv}$
7. Sebuah benda memiliki suhu sebesar 227°C. Jika konstanta emisivitas benda tersebut 3/5, intensitas radiasi yang dipancarkan adalah
 a. 5.670,3 Wb/m^2
 b. 567,03 Wb/m^2
 c. 2.126,36 Wb/m^2
 d. 212,636 Wb/m^2
 e. 21,2636 Wb/m^2
8. Salah satu konsep atom menurut Dalton adalah
 a. molekul terdiri atas atom-atom
 b. massa keseluruhan atom berubah
 c. atom tidak bergabung dengan atom lainnya
 d. atom tidak dapat membentuk suatu ikatan molekul
 e. atom dapat dipecah-pecah lagi
9. Percobaan hamburan Rutherford menghasilkan kesimpulan
 a. atom adalah bagian terkecil dari unsur
 b. elektron adalah bagian atom yang bermuatan listrik negatif
 c. atom memiliki massa yang tersebar secara merata
 d. massa atom terpusat di suatu titik yang disebut inti
 e. elektron mengelilingi inti pada lintasan tertentu
10. Salah satu model atom menurut **Bohr** adalah
 a. elektron bergerak dengan lintasan stasioner
 b. energi foton yang terpancar berbanding terbalik dengan f
 c. tidak memiliki momentum anguler
 d. atom merupakan bola pejal bermuatan positif
 e. atom tidak dapat dipecah-pecah lagi
11. Menurut model atom Bohr, elektron bergerak mengelilingi inti hanya pada lintasan tertentu, dan besarnya momentum anguler elektron pada lintasan itu adalah
 a. berbanding terbalik dengan tetapan Planck
 b. berbanding lurus dengan tetapan Planck
 c. berbanding terbalik dengan tetapan Rydberg
 d. berbanding lurus dengan tetapan Rydberg
 e. berbanding terbalik dengan momentum linear

12. Persamaan panjang gelombang spektrum atom hidrogen menurut deret Lyman adalah

a. $\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right), n = 2, 3, 4, \ldots$

b. $\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right), n = 3, 4, 5, \ldots$

c. $\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right), n = 4, 5, 6, \ldots$

d. $\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right), n = 5, 6, 7, \ldots$

e. $\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right), n = 6, 7, 8, \ldots$

13. Jika terjadi transisi elektron dalam orbit atom hidrogen, frekuensi terbesar terjadi jika elektron pindah
a. dari $n = 2$ ke $n = 1$
b. dari $n = 3$ ke $n = 2$
c. dari $n = 4$ ke $n = 3$
d. dari $n = 4$ ke $n = 2$
e. dari $n = 5$ ke $n = 2$

14. Berdasarkan mode atom Bohr, tetapan Rydberg = $1{,}097 \times 10^7$ /m. Jika terjadi transisi elektron dari lintasan $n = 4$ ke lintasan $n = 2$, dipancarkan foton dengan panjang gelombang
a. $1{,}82 \times 10^{-7}$ m
b. $2{,}43 \times 10^{-7}$ m
c. $3{,}65 \times 10^{-7}$ m
d. $4{,}86 \times 10^{-7}$ m
e. $7{,}29 \times 10^{-7}$ m

15. Jika konstanta Rydberg = $1{,}097 \times 10^7$ /m, panjang gelombang terbesar dari deret Balmer adalah
a. 1,215 Å
b. 4.050 Å
c. 5127 Å
d. 6.563 Å
e. 8.752 Å

16. Perbandingan dilatasi waktu untuk sistem yang bergerak pada kecepatan 0,8 c dengan sistem yang bergerak pada kecepatan 0,6 c adalah
a. 3 : 4
b. 4 : 3
c. 9 : 2
d. 9 : 16
e. 16 : 9

17. Jika massa diam elektron adalah $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg, massa elektron yang berkecepatan setengah laju rambat cahaya adalah
a. $2{,}10 \times 10^{-30}$
b. $2{,}10 \times 10^{-29}$
c. $1{,}05 \times 10^{-30}$
d. $1{,}05 \times 10^{-29}$
e. $1{,}05 \times 10^{-28}$

18. Menurut pengamat di sebuah planet ada dua pesawat antariksa yang mendekatinya dari arah yang berlawanan, masing-masing adalah pesawat A yang kecepatannya 0,50 c dan pesawat B yang kecepatannya 0,40 c. Menurut pilot pesawat A, besar kecepatan pesawat B adalah
a. 0,10 c
b. 0,25 c
c. 0,40 c
d. 0,75 c
e. 0,90 c

19. Sebuah roket bergerak dengan kecepatan 0,8 c. Jika dilihat oleh pengamat yang diam, panjang roket itu akan menyusut sebesar....
a. 20%
b. 36 %
c. 40 %
d. 60%
e. 80%

20. Sebuah mobil sedang bergerak dengan kelajuan 60 km/jam. Seorang penumpang mobil melemparkan sebuah batu dengan kelajuan 5 km/jam. Jika arah lemparan terhadap seseorang yang diam di pinggir jalan adalah
a. 55 km/jam
b. 60 km/jam
c. 65 km/jam
d. 70 km/jam
e. 75 km/jam

21. Kelajuan sebuah elektron yang memiliki massa 4 kali massa diamnya adalah
a. $\frac{1}{2}C\sqrt{15}$
b. $\frac{1}{4}C\sqrt{15}$
c. $\frac{1}{4}C\sqrt{16}$
d. $\frac{1}{2}C\sqrt{16}$
e. $\frac{3}{4}C\sqrt{16}$

22. Sebuah roket waktu diam di Bumi memiliki panjang 100 m, roket tersebut bergerak dengan kecepatan 0,8 c. Menurut orang di Bumi panjang roket tersebut selama bergerak adalah
a. 50 m
b. 60 m
c. 70 m
d. 80 m
e. 90 m

23. Jika laju partikel 0,6 c, perbandingan massa relativistik partikel itu terhadap massa diamnya adalah
a. 239 dan 332
b. 146 dan 239
c. 93 dan 239
d. 93 dan 332
e. 93 dan 146

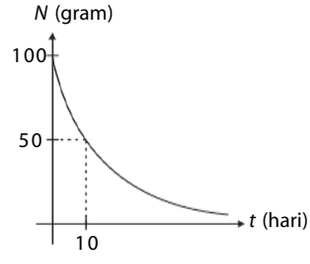
24. Jumlah proton dan neutron yang ada dalam inti ${}^{239}_{93}N_p$ adalah
a. 239 dan 332
b. 146 dan 239
c. 93 dan 239
d. 93 dan 332
e. 93 dan 146

25. Dua buah nuklida dilambangkan sebagai ${}^{16}_{8}A$ dan ${}^{16}_{8}B$. Pernyataan yang tidak benar adalah
a. tiap nuklida memiliki 8 proton
b. nuklida X memiliki 8 neutron
c. nuklida Y memiliki 9 neutron
d. kedua nuklida merupakan isotop
e. kedua nuklida memiliki sifat kimia yang berbeda

26. Unsur radioaktif adalah
 a. berasal dari unsur buatan
 b. memancarkan gelombang radio
 c. unsur yang intinya tidak stabil
 d. unasur yang memancarkan sinar-X
 e. unsur yang memiliki nomor atom besar
27. Urutan daya ionisasi sinar-sinar radioaktif dari mulai yang paling kuat adalah
 a. alfa, beta, dan gamma
 b. alfa, gamma, dan beta
 c. beta, alfa, dan gamma
 d. gamma, beta, dan alfa
 e. gamma, alfa, dan beta
28. Urutan daya tembus sinar-sinar radioaktif dimulai dari yang paling kuat dalah
 a. alfa, beta, dan gamma
 b. alfa, gamma, dan beta
 c. beta, alfa, dan gamma
 d. gamma, beta, dan alfa
 e. gamma, alfa, dan beta
29. Suatu unsur radioaktif waktu paruhnya 100 detik. Jika massa bahan radioaktif itu mula-mula 1 gram, setelah 5 menit massanya tinggal
 a. $\frac{1}{3}$
 b. $\frac{1}{4}$
 c. $\frac{1}{5}$
 d. $\frac{1}{6}$
 e. $\frac{1}{8}$
30. Setelah 60 hari, zat radioaktif yang belum berdisintegrasi masih $\frac{1}{8}$ bagian dari jumlah asalnya. Waktu paruh zat radioaktif tersebut adalah ... hari.
 a. 20 d. 35
 b. 25 e. 40
 c. 30

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan tepat.

1. Mengapa kotak tertutup rapat yang dilubangi dapat dianggap mendekati benda hitam sempurna?
2. Sebuah lampu 100 W dihubungkan ke suplai listrik pada tegangan spesifikasi. Ketika saklar dihubungkan, filamen segera mencapai suatu suhu mutlak konstan sebesar T.
 a. Berapakah laju energi hilang dalam bentuk panas oleh filamen pada suhu ini?
 b. Jika radiasi dari filamen dianggap 0,80 kali radiasi benda hitam opada suhu yang sama, tentukanlah nilai T. (Luas permukaan filamen = $5{,}0 \times 10^{-5}$ m^2)
3. Dari persamaan de Broglie diperoleh panjang gelombang sebuah elektron yang sedang bergerak adalah 0,1 nm.
 a. Hitunglah kecepatan elektron.
 b. Jika energi kinetik elektron digandakan, berpakah panjang gelombang barunya?
4. Tentukan jumlah elektron maksimum yang dapat menempati kulit:
 a. K; c. M;
 b. L; d. N.
5. Berapakah energi yang diperlukan untuk membebaskan sebuah elektron n = 1 (kulit dalam) dari sebuah atom emas (Z = 79)?
6. Sebuah piring terbang bergerak ke arah x dengan kelajuan 0,8 c terhadap Bumi. Dari piring terbang ditembakkan peluru ke arah x dengan laju 0,6 c. Tentukanlah laju peluru jika diukur oleh pengamat di Bumi berdasarkan
 a. relativitas Newton;
 b. relativitas Einstein.
7. Seorang pria bermassa 100 kg di Bumi. Jika ia berada dalam roket yang meluncur 0,6 c, berapakah massa pria tersebut?
8. Massa atom $^{16}_{8}$O adalah 15,995 sma; hidrogen 1,0078 sma; dan newton 1,0087 sma.
 a. Hitung massa total partikel pembentuk inti atom.
 b. Hitung defek massa ketika partikel tersebut bersatu membentuk sebuah atom oksigen.
 c. Hitung energi ikat inti oksigen.
 d. Hitung energi ikat rata-rata per nukleon.
9. Berapakah energi yang dibebaskan dalam peluruhan spontan $^{234}_{92}$U yang mebghasilkan sinar α? (massa $^{234}_{92}$U = 234,04 sma; $^{230}_{90}$Th = 230,03 sma; α = 4,0026 sma)
10. Perhatikan grafik berikut ini.



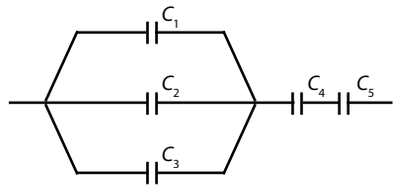
Tentukan:
 a. tetapan peluruhan;
 b. massa zat yang tinggal setelah 30 hari N (dalam gram).

Tes Kompetensi Akhir

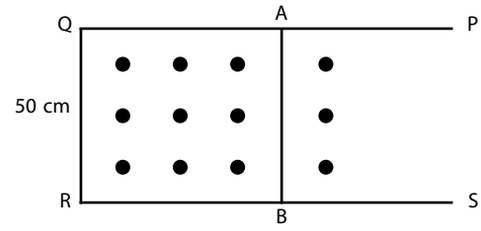
A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan.

1. Perioda dan frekuensi sebuah gelombang yang merambat dengan kecepatan 2 m/s dan panjang gelombangnya 10 cm adalah
 a. 0,02 s dan 50 Hz
 b. 0,05 s dan 20 Hz
 c. 0,05 s dan 50 Hz
 d. 0,02 s dan 20 Hz
 e. 0,02 s dan 5 Hz
2. Sebuah gelombang berjalan memenuhi persamaan $y = 0{,}2 \sin 0{,}5\pi\ (10\,t - 0{,}5\,x)$ dengan x dan y dalam cm dan t dalam sekon. Frekuensi dan panjang gelombang tersebut adalah
 a. 2,5 Hz dan 8 cm
 b. 5 Hz dan 8 cm
 c. 0,25 Hz dan 80 cm
 d. 0,25 Hz dan 8 cm
 e. 5 Hz dan 80 cm
3. Sebuah kereta api bergerak meninggalkan stasiun Gambir dengan kecepatan 36 km/jam. Jika pengawas kereta api yang ada di stasiun membunyikan pluit dengan frekuensi 1.700 Hz dan kecepatan perambatan bunyi di udara 340 m/s maka frekuensi bunyi pluit yang didengar oleh pengawas yang ada di dalam kereta api adalah
 a. 1.752 Hz
 b. 1.520 Hz
 c. 1.901 Hz
 d. 1.650 Hz
 e. 1.600 Hz
4. Dua buah tali yang sama panjangnya ditarik oleh gaya perenggangnya yang sama. Massa tali pertama 4 kali massa tali kedua. Tali pertama digetarkan dengan frekuensi 200 Hz, sedangkan tali kedua digetarkan dengan frekuensi 400 Hz. Jika panjang gelombang pada tali pertama 4 cm maka panjang gelombang pada tali kedua adalah
 a. 14 cm
 b. 24 cm
 c. 4 cm
 d. 8 cm
 e. 16 cm
5. Suatu berkas cahaya monokromatis setelah melalui sepasang celah sempit yang jaraknya 0,3 mm membentuk pola interferensi pada layar yang jaraknya 0,9 m dari celah tali. Jika jarak antara garis gelap kedua ke pusat pola 3 mm maka panjang gelombang cahaya tersebut adalah
 a. $1{,}3 \times 10^{-7}$ m
 b. $2{,}2 \times 10^{-7}$ m
 c. $3{,}3 \times 10^{-7}$ m
 d. $6{,}7 \times 10^{-7}$ m
 e. 10×10^{-7} m
6. Pada sebuah lapisan tipis terjadi interferensi maksimum ketika disinari oleh cahaya dengan panjang gelombang 4.000 Å. Jika diketahui indeks bias lapisan tipis tersebut 1,2 maka tebal lapisan tipis tersebut adalah
 a. 2.000 Å
 b. 2.500 Å
 c. 3.000 Å
 d. 3.500 Å
 e. 4.000 Å
7. Seberkas sinar monokromatik dengan panjang gelombang 4×10^{-7} m datang tegak lurus pada kisi. Jika spektrum orde kedua membentuk sudut 45° dengan garis normal pada kisi maka jumlah garis setiap cm kisi adalah
 a. $\frac{\sqrt{2}}{2} \times 10^5$
 b. $\frac{\sqrt{2}}{4} \times 10^5$
 c. $\frac{\sqrt{2}}{8} \times 10^5$
 d. $\frac{\sqrt{2}}{2} \times 10^4$
 e. $\frac{\sqrt{2}}{5} \times 10^4$
8. Sudut polarisasi mempunyai tangen yang sama besar dengan indeks bias zat. Pernyataan ini disebut Hukum
 a. Snellius
 b. Newton
 c. Huygen
 d. Fresnel
 e. Brewster
9. Warna bunyi atau timbre yang dihasilkan oleh suatu sumber ditentukan oleh
 a. tinggi nada
 b. bentuk gelombang
 c. amplitudo gelombang
 d. frekuensi gelombang
 e. nada-nada harmonik
10. Berikut adalah pernyataan yang benar mengenai bunyi dan cahaya, *kecuali*
 a. keduanya adalah gejala gelombang
 b. cahaya adalah gelombang elektromagnetik, sedangkan bunyi adalah gelombang mekanik
 c. cahaya adalah gelombang transversal, sedangkan bunyi adalah gelombang longitudinal
 d. cahaya dapat terpolarisasi, sedangkan bunyi tidak dapat terpolarisasi
 e. cahaya hanya merambat pada ruang hampa, sedangkan bunyi hanya merambat pada medium
11. Seutas tali panjang 40 m digetarkan transversal. Laju rambat gelombang transversal pada tali tersebut 50 m/s. Jika gaya tegangan pada tali tersebut 2,5 N maka massa tali adalah
 a. 0,12 kg
 b. 0,09 kg
 c. 0,08 kg
 d. 0,04 kg
 e. 0,03 kg

12. Jika sebuah pipa organa terbuka ditiup hingga timbul nada atas kedua maka dalam pipa akan terbentuk
 a. 3 perut dan 3 simpul
 b. 3 perut dan 4 simpul
 c. 4 perut dan 3 simpul
 d. 4 perut dan 4 simpul
 e. 4 perut dan 5 simpul
13. Partikel bermassa m dan bermuatan q bergerak dalam medan partikel lain yang diam dan bermuatan Q. Pernyataan yang benar untuk partikel tersebut adalah
 a. gaya yang mengarah ke pusat muatan Q adalah gaya sentral
 b. energi potensialnya tetap
 c. energi kinetiknya tetap
 d. gaya yang bekerja bukan gaya konservatif
 e. gaya Coulomb yang terjadi sebesar $F = \frac{k\,q\,Q}{r}$
14. Bola A dan bola B masing-masing bermuatan 10 coulomb dan 30 coulomb. Jarak kedua pusat bola 3 meter. Jika kedua bola terletak di udara maka energi potensial bola adalah
 a. 9×10^{11} joule
 b. 3×10^{11} joule
 c. 6×10^{11} joule
 d. 9×10^{10} joule
 e. 3×10^{10} joule
15. Satuan kuat medan listrik dapat dinyatakan dalam
 a. newton coulomb
 b. joule/newton
 c. coulomb/volt
 d. volt meter
 e. volt/meter
16. Lima kapasitor masing-masing mempunyai kapasitas F disusun seperti pada gambar. Kapasitas kapasitor yang dapat menggantikan rangkaian kapasitor tersebut adalah
 a. $\frac{1}{5}$F
 b. $\frac{3}{7}$F
 c. $2\frac{1}{3}$F
 d. $2\frac{2}{3}$F
 e. 5 F



17. Dua kawat yang sangat panjang dipasang vertikal sejajar dengan jarak d. Kawat pertama dialiri arus sebesar I ke atas. Titik P (dalam bidang kedua kawat itu) terletak di antaranya dan berjarak $\frac{1}{3}d$ dari kawat pertama. Jika induksi magnetik di titik P sama dengan nol, arus yang mengalir dalam kawat kedua adalah
 a. $\frac{1}{3}$ ke bawah
 b. $\frac{1}{2}$ ke bawah
 c. 3 I ke atas
 d. 2 I ke atas
 e. 2 I ke bawah
18. Sebuah solenoida yang panjangnya ℓ terdiri atas N lilitan. Solenoida itu dialiri arus listrik I, sehingga membangkitkan induksi magnetik B di suatu titik di tengah solenoida. B ini dapat dinyatakan dengan
 a. $\frac{\mu_0 N\ell}{2I}$
 b. $\frac{\mu_0 NI}{2\ell}$
 c. $\frac{\mu_0 N\ell}{\ell}$
 d. $\frac{\mu_0 NI}{\ell}$
 e. $\mu_0 NI\ell$
19. Besar gaya yang dialami seutas kawat lurus berarus listrik di dalam suatu medan magnetik yang serba sama tidak bergantung pada
 a. posisi kawat di dalam medan magnetik
 b. panjang kawat
 c. hambatan kawat
 d. kuat arusnya
 e. kuat medan magnetiknya
20. Pada dua buah kawat sejajar yang masing-masing dialiri arus listrik yang sama besar, timbul gaya yang besarnya 2×10^{-7} newton. Jarak antara kedua kawat itu 1 meter. Besar arus dalam setiap kawat adalah
 a. $\frac{1}{8}$ ampere
 b. $\frac{1}{4}$ ampere
 c. $\frac{1}{2}$ ampere
 d. 1 ampere
 e. 2 ampere
21. Rangkaian kawat PQRS terletak dalam medan magnet yang kuat medannya 0,5 weber/m^2, dan arahnya masuk bidang kertas seperti pada gambar berikut.



Bila kawat AB digeser ke kanan dengan kecepatan 4 m/s, gaya gerak listrik induksi yang terjadi adalah
 a. 1 volt dengan arah dari A ke B
 b. 1 volt dengan arah dari B ke A
 c. 4 volt dengan arah dari A ke B
 d. 4 volt dengan arah dari B ke A
 e. 10 volt dengan arah dari A ke B

22. Sebuah kumparan (solenoida) mempunyai induktansi 500 mH. Besar ggl induksi diri yang dibangkitkan dalam kumparan itu jika ada perubahan arus listrik dari 100 mA menjadi 40 mA dalam waktu 0,01 detik secara beraturan sama dengan
 a. 3 mV
 b. 300 mV
 c. 3 V
 d. 30 V
 e. 300 V
23. Efisiensi sebuah transformator adalah 60%. Hal ini berarti
 a. kuat arus pada kumparan primer berbanding kuat arus pada kumparan sekunder 5 : 3
 b. tegangan pada kumparan primer berbanding tegangan pada kumparan sekunder 3 : 5
 c. jumlah lilitan kumparan primer berbanding jumlah lilitan pada kumparan sekunder 3 : 5
 d. daya pada kumparan primer berbanding dengan daya pada kumparan sekunder 5 : 3
 e. hambatan pada kumparan primer berbanding hambatan pada kumparan sekunder 3 : 5
24. Jika kapasitor C, induksi L, dan tahanan R dipasang secara seri maka frekuensi resonansi rangkaian dapat diturunkan dengan
 a. mengecilkan R
 b. membesarkan L
 c. mengecilkan C
 d. membesarkan tegangan pada ujung-ujung rangkaian
 e. mengecilkan arus dalam rangkaian
25. Jika tetapan Planck $6{,}6 \times 10^{-34}$ joule detik, kecepatan cahaya 3×10^8 m/s, dan panjang gelombang cahaya 6.000 Å maka energi foton cahaya itu adalah
 a. $0{,}30 \times 10^{-19}$ joule
 b. $0{,}33 \times 10^{-19}$ joule
 c. $3{,}30 \times 10^{-19}$ joule
 d. $3{,}00 \times 10^{-19}$ joule
 e. $33{,}00 \times 10^{-19}$ joule
26. Dalam peristiwa efek fotolistrik, energi kinetik fotoelektron berbanding
 a. terbalik dengan amplitudo cahaya yang digunakan
 b. lurus dengan frekuensi cahaya yang digunakan
 c. terbalik dengan frekuensi cahaya yang digunakan
 d. lurus dengan intensitas cahaya yang digunakan
 e. terbalik dengan intensitas cahaya yang digunakan
27. Konstanta Planck $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ Js. Sebuah partikel bermassa $m = 2{,}21 \times 10^{-30}$ kg bergerak dengan kecepatan $v = 2 \times 10^5$ m/s maka panjang gelombang de Broglie-nya adalah
 a. $7{,}3 \times 10^{-60}$ nm
 b. $1{,}7 \times 10^{-3}$ nm
 c. 0,67 nm
 d. 1,50 nm
 e. $6{,}00 \times 10^{10}$ nm
28. Dari hasil percobaan Compton (efek Compton) didapat bahwa
 a. cahaya merupakan gelombang elektromagnetik
 b. cahaya menyimpang di dalam medan magnetik
 c. cahaya menyimpang di dalam medan listrik
 d. cahaya mempunyai momentum dan bersifat seperti partikel
 e. cahaya mempunyai muatan dan bersifat radioaktif
29. Pernyataan yang menyatakan bahwa "atom tersusun seperti susunan tata surya" merupakan pernyataan yang dikemukakan oleh
 a. Demokritus
 b. Dalton
 c. Thomson
 d. Rutherford
 e. Bohr
30. Jika ${}^{230}_{9}\text{Th}$ memancarkan sinar α maka nomor massa dan nomor atom inti yang dihasilkan adalah
 a. 228 dan 88
 b. 224 dan 90
 c. 224 dan 89
 d. 226 dan 86
 e. 226 dan 88
31. Jika energi total elektron atom H di kulit M adalah $-E$ maka energi total elektron di kulit L adalah
 a. $-\left(\frac{1}{9}\right)E$
 b. $-\left(\frac{1}{3}\right)E$
 c. $-\left(\frac{4}{9}\right)E$
 d. $-\left(\frac{2}{3}\right)E$
 e. $-\left(\frac{9}{4}\right)E$
32. Bila elektron atom hidrogen berpindah dari lintasan $n = 3$ ke lintasan $n = 2$ maka akan dipancarkan foton. Jika konstanta Rudberg $= 1{,}097 \times 10^7$/m maka panjang gelombang foton yang dipancarkannya adalah
 a. $6{,}6 \times 10^{-6}$ m
 b. $6{,}6 \times 10^{-7}$ m
 c. $6{,}6 \times 10^{-8}$ m
 d. $6{,}6 \times 10^{-9}$ m
 e. $6{,}6 \times 10^{-10}$ m
33. Setiap detik di matahari terjadi perubahan 4×10^9 kg materi menjadi energi radiasi. Bila laju cahaya dalam vakum adalah 3×10^{10} cm/s, daya yang dipancarkan matahari adalah
 a. $3{,}6 \times 10^{30}$ watt
 b. $4{,}8 \times 10^{27}$ watt
 c. $3{,}6 \times 10^{26}$ watt
 d. $1{,}2 \times 10^{10}$ watt
 e. $5{,}0 \times 10^{10}$ watt
34. Postulat Einstein yang benar adalah
 a. massa benda tidak konstan
 b. waktu diam dan waktu bergerak tidak sama
 c. panjang diam dan panjang bergerak tidak sama
 d. kecepatan cahaya dalam vakum yang dipancarkan oleh sumber diam dan sumber bergerak adalah sama
 e. semua hukum Fisika adalah tidak sama untuk seluruh kerangka acuan yang lembam
35. Satu gram massa berubah menjadi energi. Energi tersebut digunakan untuk mengangkat air setinggi 1 km. Jika $g = 10$ m/s^2, $c = 3 \times 10^8$ m/s, air yang dapat diangkat adalah sebanyak
 a. 3×10^5 m^3
 b. 9×10^6 m^3
 c. 3×10^8 m^3
 d. 9×10^9 m^3
 e. 3×10^{12} m^3

36. Sebuah roket panjang 100 meter dan berat 20 ton, meninggalkan Bumi dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya. Menurut teori relativitas Einstein dapat dikemukakan oleh orang Bumi bahwa
 a. massa roket < 20 ton, panjang roket > 100 meter
 b. massa roket > 20 ton, panjang roket < 100 meter
 c. massa roket < 20 ton, panjang roket < 100 meter
 d. massa roket > 20 ton, panjang roket > 100 meter
 e. massa dan panjang roket tetap

37. Atom $^{234}_{91}Pa$ mempunyai
 a. proton = 52, elektron = 91, dan neutron = 91
 b. proton = 91, elektron = 52, dan neutron = 91
 c. proton = 91, elektron = 91, dan neutron = 143
 d. proton = 91, elektron = 91, dan neutron = 52
 e. proton = 182, elektron = 91, dan neutron = 52

38. Massa inti $^{4}_{2}He$ dan $^{2}_{1}H$ masing-masing 4,002603 sma dan 2,014102 sma. Jika 1 sma = 931 MeV maka energi minimum yang diperlukan untuk memecah partikel alpha menjadi dua deutron adalah
 a. 4 MeV
 b. 14 MeV
 c. 24 MeV
 d. 34 MeV
 e. 44 MeV

39. Jika suatu neutron dalam suatu inti berubah menjadi proton maka inti itu memancarkan
 a. partikel alpha
 b. partikel beta
 c. partikel gamma
 d. proton
 e. deutron

40. Suatu unsur radioaktif mempunyai waktu paruh 120 detik. Bila massa bahan radioaktif semula 2 gram maka setelah 8 menit bahan yang tertinggal adalah
 a. $\frac{1}{32}$ gram
 b. $\frac{1}{16}$ gram
 c. $\frac{1}{8}$ gram
 d. $\frac{1}{4}$ gram
 e. $\frac{1}{2}$ gram

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan tepat.

1. Pada percobaan Melde digunakan seutas benang yang panjangnya 2 m dan massanya 10 gram. Jika beban yang digunakan pada percobaan itu 200 gram ($g = 10\ m/s^2$), tentukanlah kecepatan gelombang transversal pada benang tersebut.
2. Dua gelas minum dalamnya sama yaitu 10 cm. Gelas yang satu diisi air ($n = 1{,}333$) dan di atasnya diisi minyak ($n = 1{,}473$) hingga penuh. Jika kedua gelas disinari tegak lurus permukaan dari atas dengan sinar monokromatik, jumlah gelombang sinar di dalam kedua gelas sama. Hitunglah tebal lapisan minyak.
3. Suatu sumber bunyi titik dengan daya 12,56 watt memancarkan gelombang bunyi berupa gelombang sferis (bola). Intensitas ambang pendengaran sama dengan $10^{-12}\ W/m^2$. Tentukan taraf intensitas bunyi yang didengar oleh pendengar yang berjarak 100 meter dari sumber.
4. Sebuah kapasitor mempunyai kapasitas sebesar 5 mikrofarad. Jika terdapat udara di antara keping-kepingnya dan 30 mikrofarad. Jika di antara keping-kepingnya ditempatkan lembaran porselen, tentukan tetapan dielektrik porselen tersebut.
5. Sebuah partikel yang bermuatan 2 μC bergerak dalam medan magnet homogen $B = 10^{-4}$ T. Jika kecepatan partikel tegak lurus dengan medan magnetnya dan lintasan partikel berupa lingkaran berjari-jari 20 cm, tentukan besarnya momentum partikel tersebut.
6. Dari rangkaian listrik bolak-balik seperti pada gambar diketahui $R = 8\ \Omega$, $X_L = 6\ \Omega$, dan $X_C = 12\ \Omega$. Jika tegangan generator G = 150 V, tentukanlah:
 a. daya pada rangkaian ($p = 1.800$ watt);
 b. beda potensial antara a dan d ($V_{ad} = 150$ volt).
7. Logam yang memiliki energi ambang sebesar 53×10^{-22} joule disinari gelombang elektromagnetik yang mempunyai frekuensi 11×10^{12} m/s dan kecepatan cahaya di udara 3×10^8 m/s dan konstanta Planck $5{,}6253 \times 10^{-34}$ Js. Tentukanlah:
 a. panjang gelombang elektromagnetik yang menyibari logam;
 b. kecepatan elektron yang terlepas dari logam;
 c. energi foto elektron yang terlepas dari logam;
 d. frekuensi minimum gelombang elektromagnetik agar elektron terlepas dari logam.
8. Suatu berkas elektron ditambahkan pada gas hidrogen, dihasilkan pemancaran spektrum yang berasal dari transisi $n = 3$ ke keadaan $n = 2$. Jika energi ikat elektron pada tingkat dasar sama dengan 13,6 cV, tentukanlah energi minimum elektron.
9. Dalam reaksi $^{14}_{7}N + \alpha \rightarrow X + p$ dilepaskan sejumlah energi. Pada persamaan reaksi tersebut, tentukan unsur apakah X.
10. Sebuah partikel bergerak dengan laju $v = \frac{1}{2}\sqrt{3}C$ dengan C = kecepatan cahaya. Jika m_0 = energi diam, m = massa bergerak, E_k = energi kinetik, dan E_0 = energi diam. Tentukan:
 a. hubungan antara massa diam dan massa bergerak partikel;
 b. hubungan antara energi diam dan energi bergerak partikel.

Kunci Jawaban

Bab 1 Gejala Gelombang

Tes Kompetensi Awal

1. Gelombang adalah getaran yang merambat.
3. Jenis gelombang:
 a. berdasarkan sumbernya: gelombang mekanik dan gelombang elektromagnetik;
 b. berdasarkan arah simpangan: gelombang transversal dan gelombang longitudinal.

Tes Kompetensi Subbab A

1. Berdasarkan sumbernya, dibedakan menjadi gelombang mekanik dan gelombang elektromagnetik (untuk penjelasan lihat Hal.2). Berdasarkan arah getarnya, dibedakan menjadi gelombang transversal dan gelombang longitudinal (untuk penjelasan, lihat Hal. 3).
3. – Karena energinya makin jauh dari sumber makin berkurang.
 – Karena kedalaman laut makin pendek.
5. a. pengurangan energinya adalah 5/8 J
 b. energi gelombangnya menjadi 0,0125 J atau $\frac{1}{6}$ kali energi awalnya

Tes Kompetensi Subbab B

1. a. $y = 3{,}136 \sin \frac{\pi}{4} (t - 25)$
 b. $A = 0{,}376$ m
 c. letak simpul ke-4 adalah $x = 0{,}81$ m
 letak perut ke-3 adalah $x = 0{,}54$ m
3. a. $\lambda = 0{,}1$ m
 b. $x = 0{,}125$ m
5. $y = 0{,}23$ mm
7. $\lambda = 1{,}36$ m
 $x = 3{,}4$ m

Tes Kompetensi Subbab C

1. $\lambda_2 = 1{,}5$ cm
3. $\theta_2 = 25{,}66°$
5. a. $f_p = 475{,}8$ Hz
 b. $f_p = 337{,}8$ Hz
7. a. $f_p = 531{,}25$ Hz
 b. $f_p = 539{,}68$ Hz
 c. $f_p = 478{,}87$ Hz

Tes Kompetensi Bab 1

A. Pilihan Ganda

1. d	9. c	17. a	23. c
3. c	11. b	19. c	25. d
5. a	13. d	21. c	
7. c	15. a		

B. Soal uraian

1. B dan F
 D dan H
3. a. $Y_B = 1$ cm
 b. $\varphi = 39$ rad
5. a. $A = -10^{-7}$ cm
 b. $\lambda = 10$ m/s
 c. $v = 17.000$ cm/s
 d. $T = 5{,}88 \times 10^{-4}$ s
7. a. $\Delta\theta = 0{,}8$ rad
 b. $\lambda_B = 0{,}951$ cm
9. a. $f_p = 637{,}6$ Hz
 b. $f_p = 636{,}4$ Hz
 c. $f_p = 638{,}7$ Hz

Bab 2 Gelombang Elektromagnetik

Tes Kompetensi Awal

1. Gelombang elektromagnetik adalah gelombang yang sumbernya berasal dari getaran medan listrik dan medan magnetik.
3. Kecepatan cahaya di ruang hampa adalah 3×10^8 m/s.

Tes Kompetensi Subbab A

1. Interferensi cahaya adalah perpaduan dua gelombang cahaya yang koheren, yaitu frekuensi dan beda fasenya sama.
3. $\lambda = 60\,\mu$m
5. $d = 225 \times 10^{-9}$ m

Tes Kompetensi Subbab B

1. $\theta = 0{,}6875° = 0{,}69°$
3. $r = 359{,}9\ \mu$m
5. $\theta = 0° = 0$ rad

Tes Kompetensi Subbab C

1. $n_2 = 1{,}43$
3. $Q_1 - Q_2 = 1{,}33°$

Tes Kompetensi Bab 2

A. Pilihan Ganda

1. b	5. d	9. b	13. c
3. c	7. d	11. c	15. b

B. Soal uraian

1. $\lambda = 5.000$ Å
3. $\lambda = 2{,}95 \times 10^{-7}$

Bab 3 Gelombang Bunyi

Tes Kompetensi Awal

1. Gelombang mekanik.
3. Audiosonik adalah rentang frekuensi antara 20 Hz sampai 20.000 Hz, infrasonik adalah rentang frekuensi bunyi dibawah 20 Hz, dan ultrasonik adalah rentang frekuensi diatas 20.000 Hz.
5. Bukan, gelombang yang dipancarkan pemancar radio termasuk gelombang elektromagnetik.

Tes Kompetensi Subbab A

1. Sumber bunyi adalah getaran yang menimbulkan getaran merambat pada medium.
3. Tidak, karena tidak ada medium getarnya.
5. Nada adalah bunyi yang teratur sedangkan desah adalah bunyi yang tidak teratur.

Tes Kompetensi Subbab B

1. $v = 12{,}85$ m/s
3. $v_2 = 508$ m/s
5. $v_{al} = 0{,}5 \times 10^4$ (sama saja)

Tes Kompetensi Subbab C

1. $s = 4.080$ m/s
3. Karena melalui pendengarannya, dia mampu mengetahui benda yang ada dihadapannya.
5. a. frekuensi tetap
 b. panjang gelombang tetap
 c. cepat rambat gelombang tetap
 d. amplitudo membesar

Tes Kompetensi Subbab D

1. Difraksi gelombang bunyi adalah peristiwa pembelokan gelombang bunyi ketika melalui celah atau muka gelombang terhalang sebagian.
3. $f_2 = 307$ Hz

Tes Kompetensi Subbab E

1. $F = 25$ N
3. $\lambda_2 = 4$ cm
5. $f_0 = 560$ Hz
7. $\ell = 50$ cm

Tes Kompetensi Subbab F

1. $T_{60} = 42{,}78$ dB
3. $T_1 = 86$ dB
5. $\frac{63}{64} I_0$

Tes Kompetensi Bab 3

A. Pilihan Ganda

1. b	9. a	17. c	23. d
3. d	11. c	19. e	25. d
5. b	13. c	21. e	
7. d	15. c		

B. Soal uraian

1. $v = 110$ m/s
3. $f_{layangan} = 5$ Hz
5. a. $f_0 = 250$ Hz
 b. $f_3 = 1.250$ Hz
7. $f_{layangan} = 4$ Hz
9. $x = 1{,}2$ m

Bab 4 Medan Listrik, Potensial Listrik, dan Kapasitor

Tes Kompetensi Awal

1. Ya. Setiap benda memiliki muatan listrik. Muatan totalnya ada yang netral dan ada yang tidak netral. Netral bila jumlah muatan positif sama dengan jumlah muatan negatifnya.
3. Kapasitor merupakan komponen elektronika yang berfungsi salahsatunya sebagai penyetabil tegangan (perata tegangan) listrik. Cara kerjanya adalah ketika dihubungkan dengan sumber tegangan maka kapasitor akan menyimpan muatan. Jika tegangan luar tidak ada, kapasitor akan memiliki tegangan yang berasal dari muatan yang tersimpan tadi.

Tes Kompetensi Subbab A

1. $F = 92{,}16 \times 10^{-9}$ N
3. a. $F_{total} = 10{,}8$ N (ke arah muatan $-12\ \mu$C)
 b. Muatan harus disimpan pada jarak 0,2 m atau 1,4 ke arah muatan $-6\ \mu$C.
5. a. Jarak kedua partikel harus $\frac{1}{2}$ kali semula.
 b. Jarak kedua partikel harus $\sqrt{2}$ kali semula.
7. a. Besar sudut $\theta = 27°$.
 b. Besar tegangan pada tali $T = 0{,}4$ N.

Tes Kompetensi Subbab B

1. a. Elektron akan berhenti setelah 17×10^{-9} s.
 b. Jarak yang ditempuh elektron adalah 1 cm.
3. Letak titik yang kuat medan magnetnya nol adalah titik yang berjarak 4 cm dari muatan $(-4q)$
5. a. $\phi = 0$
 b. $\phi = 0{,}2$ Nm^2/C
 c. $\phi = 0{,}1\sqrt{3}$ Nm^2/C

Tes Kompetensi Subbab C

1. $E_p = 4{,}5 \times 10^{-13}$ joule
3. a. $V_{pusat} = 36\sqrt{2} \times 10^4$ volt
 b. $V_{pusat} = -45\sqrt{2} \times 10^3$ volt
5. $s = 0{,}2$ mm

Tes Kompetensi Subbab D

1. a. $C_{total} = 1{,}85\ \mu F$
 b. $q = 44{,}3 \times 10^{-6}$ C
3. a. $C_{total} = 10{,}8\ \mu F$
 $q_{total} = 259{,}2 \times 10^{-6}$ C
 b. $C_{total} = 6\ \mu F$
 $q_{total} = 144 \times 10^{-6}$ C
 c. $C_{total} = 6\ \mu F$
 $q_{total} = 144 \times 10^{-6}$ C
5. a. $C = 5{,}6 \times 10^{-11}$ F
 b. $q = 134{,}4 \times 10^{-11}$ C
 c. $W = 1.612{,}8 \times 10^{-11}$ joule

Tes Kompetensi Bab 4

A. Pilihan Ganda

1. b	7. c	13. b	17. a
3. e	9. b	15. a	19. d
5. e	11. e		

B. Soal uraian

1. a. $E_{total} = 1{,}42 \times 10^{-7}$ N/C
 b. $F = 5{,}5$ N
3. $k = \frac{C'}{C} = \frac{\mu F}{5\mu F} = 6$
5. $r = 0{,}2 \times 10^{-10}$ m
7. $W = 4 \times 10^{-7}\text{c} \times 9 \times 10^9\ \text{Nm}^2/\text{c}^2 \left(\frac{2\times10^{-6}\text{c}}{10^{-2}\text{m}} + \frac{2\times10^{-6}\text{c}}{5\times10^{-3}}\right)$
9. a. $\frac{5}{6}$c
 b. $\frac{3}{2}$c
 c. $5\mu F$
 d. μF

Bab 5 Medan Magnetik

Tes Kompetensi Awal

1. Ya.
3. Induktor, transformator.

Tes Kompetensi Subbab A

1. a. masuk bidang buku
 b. masuk bidang buku
 c. keluar bidang buku
3. Arah medan magnet di titik dan searah sumbu-$(-y)$ dan arah medan magnet di titik B searah sumbu-z.
5. $I = \frac{25}{\pi}$ A

Tes Kompetensi Subbab B

1. $F = 2$ N
3. $v = 4 \times 10^7$ m/s
5. a. $F = 0$ N
 b. $F = 0{,}336 \times 10^{-15}$ N (arahnya searah sumbu-y negatif)
 c. $F = 0{,}336 \times 10^{-15}$ N (arahnya searah sumbu-z negatif)

Tes Kompetensi Bab 5

A. Pilihan Ganda

1. d	9. e	17. a	25. e
3. d	11. c	19. d	27. a
5. e	13. a	21. b	29. e
7. c	15. a	23. d	

B. Soal uraian

1. a. ke dalam
 b. ke luar
 c. ke bawah
3. $B_p = -1{,}89 \times 10^{-5}$ T
5. 5 cm dari P
7. $B = 12 \times 10^{-5}$ T
9. $B_p = 6{,}67 \times 10^{-7}$ T

11. a. $B = 1{,}6 \times 10^{-6}$ T
 b. $B = 3{,}14 \times 10^{-5}$ T
13. a. $B_p = 1{,}5\pi \times 10^{-4}$ T
 b. berlawanan arah jarum jam
15. $I = 60{,}5$ A
17. $N = 125$ lilitan
19. $F = \frac{1}{2}\sqrt{3}$ N

Bab 6 Induksi Elektromagnetik

Tes Kompetensi Awal

1. Oersted menemukan bahwa arus listrik dapat menimbulkan medan magnet dan yang membuktikannya adalah Michael Faraday.
3. Ada dua jenis transformator. Transformator *step-up* untuk menaikkan tegangan dan transformator *step-down* untuk menurunkan tegangan.

Tes Kompetensi Subbab A

1. Besaran yang menyebabkan pergerakan itu adalah arus listrik.
 a. Jarum diam pada titik setimbang.
 b. Jarum menyimpang dengan simpangan yang besar.
 c. Jarum menyimpang ke arah yang berlawanan dengan ketika digerakkan masuk ke dalam kumparan.
3. a. $L = 10$ H
 b. $\varepsilon_m = 0{,}5$ volt
5. $F = 4 \times 10^{-9}$ N
 Arah arus dalam kawat PQ dari Q ke P.

Tes Kompetensi Subbab B

1. a. $V_2 = 1.500$ volt
 b. $I_1 = 25$ A
 c. $p_1 = p_2 = 3.000$ watt
3. a. $N_1 = 6.600$ lilitan
 b. $I_p = 44$ mA
 c. $P_p = 9{,}68$ watt

Tes Kompetensi Subbab C

1. a. Harga efektif kuat arus dan tegangan bolak-balik adalah harga kuat arus dan tegangan bolak-balik yang setara dengan harga kuat arus dan tegangan searah ketika berubah menjadi energi kalor.
 b. Harga maksimum adalah kuat arus dan tegangan bolak-bolak adalah harga kuat arus dan tegangan bolak-balik tertinggi yang terbaca pada grafik atau berdasarkan perhitungan.
 c. Harga kuat arus dan tegangan rata-rata adalah harga kuat arus dan tegangan bolak-balik ketika diubah menjadi kuat arus dan tegangan searah.
3. a. $Z = 50\ \Omega$
 b. $X_L = 30\ \Omega$
 c. $V_{mL} = 60$ volt
5. $V = 20 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$
7. a. $I = 34.285{,}7$ A
 b. $I = 338.983$ A

Tes Kompetensi Bab 6

A. Pilihan Ganda

1. d	11. c		
3. d	13. b		
5. b	15. c		
7. d	17. a		
9. b	19. b		

B. Soal uraian

1. Jika sebuah kumparan mengalami perubahan jumlah garis-garis gaya magnet (fluks magnetik), pada kawat kumparan timbul arus listrik.
3. a. Prinsip kerja dinamo arus bolak-balik: kumparan yang diletakkan dalam medan magnet berputar sehingga mengalami perubahan garis gaya magnetik. Akibatnya, terjadi ggl induksi dan arus listrik yang dihasilkannya berupa arus bolak-balik.
 b. Prinsip kerja dinamo arus searah sama dengan prinsip kerja generator arus bolak-balik. Perbedaannya, pada generator arus searah dipasang komutator untuk mengubah arus bolak-balik dari generator menjadi arus searah.
5. a. $\eta = 21{,}8\%$
 b. $N_p : N_s = 55 : 6$
7. a. $P_p = 88$ W
 b. $N_s = 120$ lilitan
 c. $V_s = 22$ volt
 $\eta = 93{,}18\%$
9. $V_s = 125$ volt; $I_p = 4$ A; $P_s = 10$ kW

Tes Kompetensi Fisika Semester 1

A. Pilihan Ganda

1. e	11. b	21. e	31. a
3. b	13. b	23. a	33. c
5. c	15. d	25. c	35. c
7. d	17. c	27. a	
9. b	19. a	29. d	

B. Soal uraian

1. $f_p = 2.193{,}5$ Hz
3. $d = 85{,}7$ mm
5. $N = 157$ lilitan
7. $B = 6{,}7 \times 10^{-4}$ T
 a. $\Phi = 6{,}7 \times 10^{-6}$ Wb
 b. $\Phi = 0$
 c. $\Phi = 4 \times 10^{-6}$ Wb
9. $X_L = 3.157{,}89\pi$

Bab 7 Radiasi Benda Hitam

Tes Kompetensi Awal

1. Kain berwarna hitam, karena hitam menyerap semua cahaya yang datang sehingga lebih banyak kalor yang diterima dibandingkan warna putih yang memantulkan semua cahaya yang datang.
3. Ya, pada setiap saat benda memancarkan radiasi, artinya, mengeluarkan energi.
5. Efek fotolistrik adalah gejala terlepasnya elektron atom suatu logam ketika disinari oleh cahaya dengan frekuensi tertentu. Tokohnya adalah Hertz dan Albert Einstein. Efek Compton adalah gejala berkurangnya frekuensi (energi foton) ketika bertumbukan dengan elektron, tokohnya adalah Arthur H. Compton.

Tes Kompetensi Subbab A

1. $A = 391{,}76$ m^2
3. $T = 1{,}24 \times 10^3$ K
5. $I = 1{,}688$ W/m^2
7. $P = 0{,}0147$ watt

Tes Kompetensi Subbab B

1. a. $\lambda = 6{,}875 \times 10^{-7}$ m
 b. $E_k = 0{,}95$ eV
 c. $V_0 = 0{,}95$ volt

3. $\lambda' = 0{,}724 \times 10^{-10}$ m
5. a. $\lambda = 0{,}36 \times 10^{-9}$ m
 b. $\lambda = 1{,}98 \times 10^{-13}$ m
 c. $\lambda = 8{,}25 \times 10^{-40}$ m
7. de Broglie menggagas bahwa partikel elektron yang bergerak dapat memiliki sifat gelombang yang dicirikan oleh panjang gelombang.
9. $\lambda = 0{,}33 \times 10^{-19}$ m

A. Pilihan Ganda

1. c	9. c	17. c	23. e
3. c	11. b	19. d	25. c
5. d	13. b	21. c	
7. c	15. d		

B. Soal uraian

1. $f_2 = 1{,}24 \times 10^{15}$ Hz
3. $v = 4{,}4 \times 10^{6}$ joule
5. $P = 29{,}17$ watt
7. $v_2 = \sqrt{\dfrac{h4f - W}{m}}$
9. Seperti eksperimen yang telah dilakukan oleh Davisson-Germer, berkas elektron dijatuhkan pada kristal tunggal nikel. Ternyata, pada sudut jatuh tertentu didapat titik maksimum. Ini menunjukkan bahwa berkas elektron tersebut menunjukkan pola interferensi.

Bab 8 Fisika Atom

Tes Kompetensi Awal

1. Elektron berada di kulit atom; Proton berada di inti atom; Neutron berada di inti atom.
3. Kulit K mampu menampung 2 elektron; Kulit L mampu menampung 8 elektron; Kulit M mampu menampung 18 elektron; Kulit N mampu menampung 32 elektron; dan seterusnya.

Tes Kompetensi Subbab A

1. Ada dua alasan yang mendasari kesimpulan Thomson, yaitu:
 a. Konsep dasar yang menyatakan bahwa atom itu netral;
 b. Untuk atom teringan, hidrogen. Ternyata, nilai e/m jauh lebih kecil dari massa atomnya.
3. Terpanjang adalah $\lambda = 6{,}56 \times 10^{-7}$ m
 Terpendek adalah $\lambda = 3{,}65 \times 10^{-7}$ m
5. $n = 1{,}1 \times 10^{-3}$
7. a. $v = 5{,}45 \times 10^{5}$ m/s
 b. $E_k = 1{,}35 \times 10^{-19}$ joule
 c. $E_p = 2{,}72 \times 10^{-19}$ joule
 d. $E_T = 4{,}07 \times 10^{-19}$ joule
9. $f = 2{,}46 \times 10^{15}$ Hz

Tes Kompetensi Subbab B

1. Untuk kulit M, $n = 3$ maka jumlah elektron yang diperbolehkan adalah $2n^2 = 2(3)^2 = 18$.
 Untuk kulit N, $n = 4$ maka jumlah elektron yang diperbolehkan adalah $2n^2 = 2(4)^2 = 32$.
3. Bilangan kuantum utama adalah bilangan kuantum yang menyatakan besar energi total dalam kulit atom. Bilangan kuantum orbital adalah bilangan kuantum yang menyatakan besarnya momentum sudut elektron yang berotasi terhadap poros inti atom. Bilangan kuantum spin adalah bilangan kuantum yang menyatakan arah perputaran elektron terhadap sumbunya yang dapat menimbulkan momen magnetik.
5. Karena menurut larangan Pauli, tidak boleh ada elektron yang memiliki empat bilangan kuantum yang sama. Jika ada elektron ketiga dalam suatu orbital maka bilangan kuantum elektron pertama dan ketiga akan sama.
7. Spektrum absorpsi adalah spektrum yang terjadi karena penyerapan panjang gelombang tertentu dari suatu cahaya. Spektrum emisi adalah spektrum yang dihasilkan oleh pancaran gelombang elektromagnetik.
9. Dalam suatu golongan dari atas ke bawah, energi ionisasi atom semakin menurun, sedangkan dalam suatu periode dari kiri ke kanan, energi ionisasi semakin meningkat.

A. Pilihan Ganda

1. e	9. b	17. d	23. b
3. a	11. d	19. d	25. a
5. d	13. b	21. a	
7. c	15. d		

B. Soal Uraian

1. Metode atom Rutherford:
 a. Atom terdiri atas inti atom yang bermuatan positif. Inti atom mengandung hampir seluruh massa atom dan dikelilingi oleh elektron-elektron bermuatan negatif, seperti model tata surya.
 b. Selama mengelilingi inti, gaya sentripetal pada elektron dibentuk oleh gaya tarik elektrostatik (gaya Coulomb).
3. a. panjang gelombang terpendek deret Lyman:
 $\lambda = 9{,}12 \times 10^{-8}$ m
 b. Panjang gelombang terpendek deret Paschen:
 $\lambda = 9{,}2 \times 10^{-8}$ m
 c. Panjang gelombang terpendek deret Pfund:
 $\lambda = 2{,}279 \times 10^{-8}$ m
5. $\Delta E = 2{,}04 \times 10^{-18}$ joule m/s
 $\lambda = 9{,}75 \times 10^{-8}$ m
 $f = 0{,}3 \times 10^{16}$ Hz
7. $E_2 = -3{,}4$ eV
 $E_3 = -1{,}51$ eV
 $E_h = E_2 - E_5 = 1{,}89$ eV
9. a. Konfigurasi elektronnya adalah $1s^2$, $2s^2$, $2p^6$, $3s^2$, $3p^6$, $4s^1$.
 b. Karena konfigurasi elektron tidak stabil, untuk mencapai kestabilan atom kalium cenderung bereaksi dengan atom lain atau memberntuk ion K^+ dengan cara melepaskan 1 elektronnya.

Bab 9 Teori Relativitas Khusus

Tes Kompetensi Awal

1. Gerak relatif adalah gerak yang ditinjau dari kerangka acuan tertentu. Pada kasus tadi, jika ditinjau dari kerangka acuan pohon yang diam makan Andalah yang bergerak.
3. Tidak mungkin. Di alam ini kecepatan tertinggi adalah kecepatan cahaya, yaitu 3×10^8 m/s.

Tes Kompetensi Subbab A

1. Manusia dahulu berpandangan bahwa gelombang cahaya merambat melalui suatu medium. Pada awal abad ke-19, para ahli berhipotesis bahwa medium tersebut adalah eter yang tersebar sampai ruang luar angkasa.
3. Prinsip relativitas Galileo dikenal sebagai prinsip relativitas klasik karena hanya berkaitan dengan hukum-hukum gerak Newton. Gerak dan persamaan gerak suatu benda sama dalam semua kerangka acuan inersial.
5. Metode yang dilakukan dalam percobaan Morley-Michelson adalah dengan cara menghitung waktu yang diperlukan untuk mencapai jarak yang sama jika arah cahaya searah dengan arah gerak eter dan jika cahaya tegak lurus dengan arah eter. Kesimpulan dari percobaan itu, ternyata waktu yang diperlukan sama saja. Artinya, kecepatan cahaya itu tetap dan eter tidak ada.

Tes Kompetensi Subbab B

1. $v = 0{,}75c$
3. a. $v = 0{,}8c$
 b. $v = 0{,}988c$
 c. $v = 0{,}9c$
 d. $v = 0{,}988c$
5. a. 2 m
 b. $L = 1{,}2$ m
7. Umur A 38,3 tahun dan umur B 33 tahun.

A. Pilihan Ganda

1. c	9. a	17. d	23. e
3. c	11. d	19. b	25. c
5. b	13. a	21. c	
7. e	15. c		

B. Soal Uraian

1. $V_p = 0{,}56$ c
5. $v = 2 \times 10^8$ m/s $= \frac{2}{3}c$
 $P = 3{,}57\ c$
9. $\Delta t = \dfrac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \dfrac{10}{\sqrt{1 - \frac{(0{,}98c)^2}{c^2}}}$

Bab 10 Fisika Inti dan Radioaktivitas

Tes Kompetensi Awal

1. Nomor atom adalah nilai yang menunjukkan jumlah proton atau elektron dalam atom netral, sedangkan nomor massa adalah nilai yang menunjukkan jumlah proton dan neutron dalam inti atom.
3. Peluruhan adalah proses perubahan suatu inti atau menjadi inti atom baru.
5. Reaksi nuklir merupakan reaksi yang melibatkan komponen inti atom sehingga menghasilkan inti baru, sedangkan reaksi kimia adalah reaksi yang hanya melibatkan elektron yang ada pada kulit atom dan tidak menghasilkan inti atom baru.

Tes Kompetensi Subbab A

1. Efeknya, massa inti atom yang terbentuk lebih ringan dari massa total nukleon pembentuknya ini diakibatkan sebagian massa nukleon berubah menjadi energi untuk membentuk inti.
3. a. $\Delta m = 0{,}187$ sma
 b. $\Delta E = 174{,}1905$ MeV
5. a. $\Delta m = 0{,}09$ sma
 b. $\Delta E = 83{,}835$ MeV
 c. $E = 6{,}98625$ MeV

Tes Kompetensi Subbab B

1. Partikel A adalah gamma.
 Partikel B adalah proton.
3. $t = 10{,}5$ hari
5. $T_{\frac{1}{2}} = 0{,}75$ jam
7. $\lambda = 2{,}4 \times 10^{-4}$

Tes Kompetensi Subbab C

1. a. alfa
 b. oksigen
 c. neutron
 d. gamma
3. Energi fisinya adalah 12916,69866/MeV
5. Energi ikat Si adalah 208,74882 MeV.
 Energi ikat C adalah 80,17772 MeV.
 Energi ikat N adalah 90,74457 MeV.
7. Energinya adalah 3745,5615 MeV.

Tes Kompetensi Subbab D

1. Teras, elemen bakar, moderator, batang kendali, *shielding*, dan pendingin.
3. Reaktor daya, reaktor produksi isotop, dan reaktor penelitian.
5. Dalam bidang kedokteran, radioisotop dilakukan dengan cara menyuntikkan isotop radioaktif ke dalam tubuh. isotop tersebut kemudian ditangkap oleh detektor di luar tubuh sehingga diperoleh gambaran yang menunjukkan distribusinya dalam tubuh.

A. Pilihan Ganda

1. a	9. b	17. c	23. e
3. c	11. e	19. e	25. c
5. a	13. d	21. d	
7. b	15. a		

B. Soal Uraian

1. Dengan memasukkan uranium ke dalam kotak timah tertutup dan menyimpannya sehingga uranium tidak menerima cahaya dari luar. Ternyata, uranium tetap menunjukkan gejala radiasi.
3. Energi ikat inti adalah energi yang dimiliki inti untuk mengikat nuklida penyusunnya. Energi ikat ini berasal dari massa nuklida yang hilang ketika bergabung membentuk inti.
5. Jumlah energi dikali waktu (L) $= 6 \times 10^4$ kWh
 Daya yang dihasilkan (P) $= 30$ MW $= 3 \times 10^4$ kW
 $t = 2$ jam

Tes Kompetensi Fisika Semester 2

A. Pilihan Ganda

1. d	9. d	17. c	25. e
3. d	11. b	19. c	27. a
5. e	13. a	21. b	29. e
7. c	15. d	23. c	

B. Soal Uraian

1. Karena berkas cahaya yang memasuki lubang pada kotak hampir diserap sempurna melalui beberapa kali pemantulan pada dinding-dinding kotak. Dengan demikian, berkas cahaya yang masuk ke lubang hampir tidak keluar lagi (terperangkap) karena energinya habis diserap.
3. a. $7{,}3 \times 10^6$ m/s.
 b. $5\sqrt{2} \times 10^{-2}$ nm
5. –84.900 eV
7. 125 kg
9. 6,8894 MeV

Tes Kompetensi Akhir

A. Pilihan Ganda

1. b	11. d	21. b	31. e
3. d	13. a	23. d	33. a
5. d	15. e	25. c	35. b
7. c	17. d	27. d	37. c
9. e	19. c	29. d	39. b

B. Soal Uraian

1. $v = 20$ m/s
3. 80 dB
5. $P = 4 \times 10^{-9}$ Ns
7. a. $\lambda = 27 \times 10^{-6}$ m
 b. $v_e = 6{,}65 \times 10^4$ m/s
 c. $19{,}98 \times 10^{-22}$ joule
 d. $7{,}99 \times 10^{12}$ Hz
9. 1,9 eV

Apendiks

Simbol-Simbol Matematika

$=$	:	sama dengan	Δx	: perubahan x
$\neq$	:	tidak sama dengan	$\lvert x\rvert$	: nilai absolut x
$\approx$	:	hampir sama dengan	$n!$	: $n(n-1)(n-2)\ldots 1$
$\sim$	:	dalam orde	Σ	: jumlah
$\propto$	:	sebanding dengan	lim	: limit
$>$	:	lebih besar dari	$\Delta t \to 0$	: Δt mendekati nol
$\geq$	:	lebih besar sama dengan	$\frac{dx}{dt}$	: turunan x terhadap t
$\gg$	:	jauh lebih besar dari	$\frac{\partial x}{\partial t}$	: turunan parsial x terhadap t
$<$	:	lebih kecil	$\int$	: integral
$\leq$	:	lebih kecil sama dengan		
$\ll$	:	jauh lebih kecil dari		

Rumus Trigonometri

$$\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$$

$$\sec^2\theta - \tan^2\theta = 1$$

$$\csc^2\theta - \cot^2\theta = 1$$

$$\sin 2\theta = 2\sin\theta\cos\theta$$

$$\cos 2\theta = \cos^2\theta - \sin^2\theta = 2\cos^2\theta - 1 = 1 - 2\sin^2\theta$$

$$\tan 2\theta = \frac{2\tan\theta}{1-\tan^2\theta}$$

$$\sin\frac{1}{2}\theta = \sqrt{\frac{1-\cos\theta}{2}} = \sqrt{\frac{1+\cos\theta}{2}}\tan\frac{1}{2}\theta = \sqrt{\frac{1-\cos\theta}{1+\cos\theta}}$$

Turunan Fungsi-Fungsi Tertentu

$\frac{dC}{dt} = 0$ dengan C adalah konstanta

$$\frac{d(t^n)}{dt} = nt^{n-1}$$

$$\frac{d}{dt}\sin\omega t = \omega\cos\omega t$$

$$\frac{d}{dt}\cos\omega t = -\omega\sin\omega t$$

$$\frac{d}{dt}\tan\omega t = \omega\sec^2\omega t$$

$$\frac{d}{dt}e^{bt} = be^{bt}$$

$$\frac{d}{dt}\ln bt = \frac{1}{t}$$

Rumus-Rumus Integrasi

$$\int A\,dt = At$$

$$\int At\,dt = \frac{1}{2}At^2$$

$$\int At^n\,dt = A\frac{t^{n+1}}{n+1} \qquad n \neq -1$$

$$\int At^{-1}\,dt = A\ln t$$

$$\int e^{bt}\,dt = \frac{1}{b}e^{bt}At$$

$$\int \cos\omega t\,dt = \frac{1}{\omega}\sin\omega t$$

$$\int \sin\omega t\,dt = -\frac{1}{\omega}\cos\omega t$$

Satuan-Satuan Dasar

Panjang	Meter (m) adalah jarak yang ditempuh oleh cahaya di ruang vakum dalam waktu 1/299.792.458 sekon	Arus	Ampere (A) adalah arus pada dua kawat panjang paralel yang terpisah sejauh 1 meter dan menimbulkan gaya magnetik per satuan panjang sebesar 2×10^{-7} N/m
Waktu	Sekon (s) adalah waktu yang diperlukan untuk 9.192.631.770 siklus pada radiasi yang berhubungan dengan transisi antara dua tingkat hiperfin dengan keadaan dasar pada atom 133 Cs	Temperatur	Kelvin (K) adalah 1/273.16 dari temperatur termodinamika pada *triple point air*
Massa	Kilogram (kg) adalah massa pada Standar Internasional untuk bobot dan ukuran yang disimpan di Sevres, Prancis	Intensitas cahaya	Candela (cd) adalah intensitas cahaya dalam arah tegak lurus permukaan benda hitam seluas 1/600.000 m pada temperatur beku platinum dengan tekanan 1 atm

Satuan-Satuan Turunan

Gaya	newton (N)	1 N = 1 kg m/s^2	Hambatan listrik	ohm (Ω)	1 Ω = 1 V/A
Kerja, Energi	joule (J)	1 J = 1 N/m	Kapasitas listrik	farad (F)	1 F = 1 C/V
Daya	watt (W)	1 W = 1 J/s	Medan magnet	tesla (T)	1 T = 1 N/Am
Frekuensi	hertz (Hz)	1 Hz = 1/s	Fluks magnet	weber (Wb)	1Wb = 1 T/m^2
Muatan listrik	coulumb (C)	1 C = 1 A/s	Induktansi	henry (H)	1 H = 1 J/A^2
Potensial listrik	volt (V)	1 V = 1 J/C			

Data Terrestrial

Percepatan gravitasi g	9,80665 m/s^2	Tekanan	101,325 kPa
Massa bumi M_B	$5{,}98 \times 10^{24}$ kg		1,00 atm
Jari-jari bumi, R_B, rata-rata	$6{,}37 \times 10^{6}$ m	Massa molar udara	28,97 g/mol
	3960 mil	Massa jenis udara (STP), ρ_{udara}	1,293 kg/m^3
Kecepatan lepas $\sqrt{2R_Bg}$	$1{,}12 \times 10^{4}$ m/s	Kecepatan suara (STP)	331 m/s
Konstanta matahari*	1,35 KW/m^2	Kalor didih air (0°C, 1 atm)	333,5 kJ/kg
Suhu dan tekanan standar (STP):		Kalor penguapan air (100°C, 1 atm)	2,257 MJ/kg
Temperatur	273,15 K		

* Daya rata-rata yang terjadi pada 1 m^2 di luar atmosfer bumi pada jarak rata-rata antara bumi dan matahari.

Data Astronomi

Bumi		Bulan	
Jarak ke bulan*	$3{,}844 \times 10^{8}$ m	Massa	$7{,}35 \times 10^{22}$ kg
	$2{,}389 \times 10^{5}$ mil	Jari-jari	$1{,}738 \times 10^{6}$ m
Jarak ke matahari, rata-rata*	$1{,}496 \times 10^{11}$ m	Periode	27,32 hari
	1,00 AU	Percepatan gravitasi pada	
Kecepatan orbit, rata-rata	$2{,}98 \times 10^{4}$ m/s	permukaan	1,62 m/s^2
Matahari			
Massa	$7{,}35 \times 10^{22}$ kg		
Jari-jari	$1{,}738 \times 10^{6}$ m		

* pusat ke pusat

Konstanta Fisika

Konstanta gravitasi	G	$6{,}672 \times 10^{-11}$ N m^2/kg^2	Permitivitas ruang hampa	$\in_0$	$8{,}854 \times 10^{-12}$ C^2/Nm^2
Kecepatan cahaya	c	$2{,}998 \times 10^{8}$ m/s	Permeabilitas ruang hampa	μ_0	4×10^{-7} N/A^2
Muatan elektron	e	$1{,}602 \times 10^{-19}$ C	Konstanta Planck	h	$6{,}626 \times 10^{-34}$ Js
Konstanta Avogadro	N_A	$6{,}002 \times 10^{23}$ partikel/mol		$\hbar$	$1{,}055 \times 10^{-34}$ Js
Konstanta gas	R	$8{,}314 \times 10^{-11}$ J/mol K	Massa elektron	m_e	$9{,}109 \times 10^{-31}$ kg
Konstanta Boltzmann	k	$1{,}381 \times 10^{-23}$ J/K	Massa proton	m_p	$1{,}672 \times 10^{-27}$ kg
Unit massa terpadu	u	$1{,}661 \times 10^{-24}$ g	Massa neutron	m_n	$1{,}675 \times 10^{-27}$ kg
Konstanta Coulomb	k	$8{,}988 \times 10^{9}$ N m^2/C^2			

Faktor-Faktor Konversi

Panjang
1 km = 0,6215 mil
1 mil = 1,609 km
1 m = 1,0396 yd = 3,281 ft = 39,37 inci
1 inci = 2,54 cm
1 ft = 12 inci = 30,48 cm
1 yd = 3ft = 91,44 cm
1 tahun cahaya = 1c tahun = $9{,}461 \times 10^{15}$ m
1 Å = 0,1 nm

Luas
1 m^2 = 10^4 cm^2
1 km^2 = 0,3851 mil^2 = 247,1 ha
1 inci^2 = 6,5416 cm^2
1 ft^2 = $9{,}29 \times 10^{-2}$ m^2
1 m^2 = 10,76 ft^2
1 ha = 43,560 ft^2
I mil^2 = 640 ha^2 = 590 km^2

Volume
1 m^3 = 10^6 cm^3
1 L = 1.000 cm^3 = 10^{-3} m^3
1 gal = 3,786 L
1 gal = 4 qt = 8 pt = 128 oz = 231 inci^3
1 inci^3 = 16,39 cm^3
1 ft^3 = 1.728 inci^3 = 28,32 L = $2{,}832 \times 10^4$ cm^3

Waktu
1 jam = 60 menit = 3,6 ks
1 hari = 24 jam = 1.440 menit = 86,4 ks
1 tahun = 365,24 hari = 31,56 Ms

Kecepatan
1 km/jam = 0,2778 m/s = 0,6215 mil/jam
1 mil/jam = 0,4470 m/s = 1,609 km/jam
1 mil/jam = 1,467 ft/s

Sudut dan Kecepatan Sudut
1 rad = 180°
1 rad = 57,30°
1° = $1{,}745 \times 10^{-2}$ rad
1 rev/menit = 0,1047 rad/s
1 rad/s = 9,549 rev/menit

Massa
1 kg = 1.000 g
1 ton = 1.000 kg = 1 Mg
1 u = $1{,}6606 \times 10^{-27}$ kg
1 kg = $6{,}022 \times 10^{23}$ u
1 slug = 14,59 kg
1 kg = $6{,}852 \times 10^{-2}$ slug
1 u = 931,50 MeV/c^2

Massa Jenis
1 g/cm^3 = 10.000 kg/m^3 = 1 kg/L
(1 g/cm^3)g = 62,4 lb/ft^3

Gaya
1 N = 0,2248 lb = 10^5 dyne
1 lb = 4,4482 N
(1 kg)g = 2,2046 lb

Tekanan
1 Pa = 1 N/m^2
1 atm = 101,325 kPa = 1,01325 bar
1 atm = 14,7 lb/inci^2 = 760 mmHg
1 torr = 1 mmHg = 133,32 Pa
1 bar = 100 kPa

Energi
1 kWh = 3,6 MJ
1 kal = 4,184 J
1 Latm = 101,325 J = 24,217 kal
1 Btu = 778 ft lb = 252 kal = 1054,35 J
1 eV = $1{,}602 \times 10^{-19}$ J
1 u c^2 = 931,50 MeV
1 erg = 10^{-7} J

Daya
1 daya kuda = 550 ft lb/s = 745,7 W
1 Btu/menit = 17,58 W
1 W = $1{,}341 \times 10^{-3}$ daya kuda = 0,7376 ft lb/s

Medan Magnet
1 G = 10^{-4} T
1 T = 10^4 G

Konduktivitas Termal
1 W/m K = 6,938 Btu inci/jam ft^2 °F
1 Btu inci/jam ft^2 °F = 0,1441 W/mK

Senarai

A

Arus pusar (eddy): arus melingkar yang timbul pada lempengan besi lunak dalam transformator.

B

Benda hitam: benda yang mampu menyerap cahaya/radiasi yang datang kepadanya.

D

Daya urai optik: kemampuan sebuah lensa untuk memisahkan bayangan dari dua titik yang terpisah satu sama lain pada jarak minimum.
Defek massa: jumlah massa yang hilang ketika atom terbentuk dari nukleon (penyusunnya).
Dielektrik: bahan yang dipasang di antara elektroda positif dan negatif pada kapasitor.
Difraksi: proses pembelokan atau penyebaran ketika melalui suatu celah sehingga menimbulkan pola gelap-terang.

E

Efek fotolistrik: gejala terlepasnya elektron dari atom pada logam yang disinari oleh cahaya berenergi tinggi.
Emisivitas benda: kemampuan suatu benda untuk memancarkan gelombang elektromagnetik.
Energi ikat inti: energi yang dibutuhkan ketika atom terbentuk.

F

Fatamorgana: gejala timbulnya pemandangan seperti air di atas tanah (permukaan) yang memiliki kerapatan udara berbeda dengan kerapatan udara yang ada disekitarnya.
Fluks listrik: banyaknya garis gaya listrik yang menembus suatu luas permukaan.
Foton: partikel yang tidak memiliki massa.

G

Gaya gerak listrik (ggl): beda potensial maksimum antara kutub positif dan kutub negatif listrik ketika tidak ada arus yang mengalir.
Gaya Lorentz: gaya yang dialami oleh muatan bergerak ketika berada dalam medan magnetik.
Gelombang berjalan: gelombang yang getarannya merambat, simpangan di tiap titik mengalami perubahan terus.
Gelombang elektromagnetik: gelombang yang sumbernya berupa getaran listrik atau getaran magnetik atau gabungan keduanya.
Gelombang mekanik: gelombang yang sumbernya berupa getaran mekanik (getaran partikel).
Gelombang partikel: sifat gelombang yang muncul pada partikel.
Gelombang stasioner: gelombang yang getarannya tetap, simpangan di tiap titik selalu tetap.

I

Induksi elektromagnetik: gejala timbulnya listrik dari medan magnet.
Interferensi gelombang: penjumlahan dua gelombang atau lebih yang koheren.
Isotop: atom-atom yang memiliki nomor atom sama.

K

Kapasitas kapasitor: kemampuan suatu kapasitor untuk memeroleh dan menyimpan muatan listrik.
Kapasitor elektrolit: kapasitor yang dielektriknya berupa larutan kimia.
Kapasitor variabel: kapasitor yang nilainya dapat diubah-ubah.
Komutator: alat pengubah polaritas kutub listrik pada generator.

M

Medan listrik: daerah radial di sekitar sumber listrik yang masih dipengaruhi sumber listrik tersebut.

N

Nomor atom: bilangan yang menunjukkan jumlah proton dalam atom.
Nomor massa: bilangan yang menunjukkan jumlah proton ditambah jumlah neutron dalam atom.

P

Permukaan Gauss: suatu permukaan khayal yang digambarkan untuk mempermudah peninjauan keadaan listrik di daerah tersebut.
Perut gelombang: titik-titik pada gelombang yang memiliki simpangan maksimum.
Polarisasi: proses pembatasan getaran pada gelombang cahaya yang arahnya tegak lurus dengan celah.

R

Radiasi termal: pemancaran gelombang elektromagnetik yang berbentuk panas.
Radioaktivitas: proses terurainya beberapa inti atom tertentu secara spontan yang diikuti dengan pemancaran partikel alfa, beta, atau gamma.
Reaksi fisi: reaksi penguraian inti atom.
Reaksi fusi: reaksi penggabungan inti atom.
Refleksi: pemantulan.
Refraksi (pembiasan): perubahan yang dialami oleh muka gelombang pada saat melintas miring dari satu medium ke medium lain.
Resonansi: peristiwa ikut bergetarnya suatu benda yang memiliki frekuensi alamiah sama dengan benda yang bergetar.

S

Simpul gelombang: titik-titik pada gelombang yang memiliki simpangan minimum.
Sinar monokromatik: cahaya yang hanya memiliki satu panjang gelombang.
Solenoida: kumparan kawat yang terlilit pada suatu pembentuk silinder.
Sonar: alat pembangkit gelombang pada suatu penelitian untuk mendeteksi suatu objek.
Spektrum cahaya: penyebaran/pengurutan cahaya berdasarkan panjang gelombang yang dimilikinya.
Superposisi: penjumlahan dua gelombang.

T

Tangki riak: tangki air yang berfungsi untuk menggambarkan sifat-sifat yang dimiliki gelombang.
Taraf intensitas: intensitas bunyi yang amsih dapat didengar.
Toroida: solenoida yang dibentuk melingkar.
Transformator: alat penaik atau penurun tegangan listrik.

U

Ultrasonografi: alat untuk menggambarkan bagian tubuh dalam melalui pemanfaatan gelombang.

W

Waktu paruh: waktu yang dibutuhkan oleh suatu zat untuk meluruh menjadi setengahnya dari keadaan awal.

Indeks

A

Albert Einstein 184
ampere 177
anode 183
Arthur H. Compton 186
arus 177, 178, 183, 185, 192, 195

B

beda potensial 183, 184, 189, 190, 194, 195, 196
benda hitam 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 192, 193

C

coulomb 196

D

daya 177, 178, 181, 183
daya radiasi 177, 183
difraksi 183, 188, 189, 190, 196
difraksi gelombang 189

E

energi total gelombang 6, 7

F

fase 9, 10, 11, 13, 14, 18
fatamorgana 20
frekuensi 4, 5, 6, 7, 9, 10, 14, 15, 18
frekuensi gelombang 4, 5, 6, 7, 10
frekuensi sudut 5, 7

G

garis normal 20, 21
gelombang berjalan 1, 7, 8, 9, 10
gelombang bunyi 2, 3
gelombang elektromagnetik 2, 7
gelombang longitudinal 2, 3, 4, 7
gelombang mekanik 2, 3, 7
gelombang transversal 2, 3, 4, 7

I

indeks bias 20, 21
induksi elektromagnetik 109, 121, 123, 131, 132, 133, 134, 141, 142, 146, 165, 166, 167, 169
induksi magnetik 105, 106, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 118, 119, 121, 124, 126, 127, 128, 129, 130, 133, 135, 136, 139, 141, 148, 173, 174
induktansi 136, 137, 138, 139, 140, 141, 153, 154, 164, 165, 166, 167, 171, 173, 174
induktansi diri 136, 137, 138, 139, 153, 154, 166, 167, 173
induktansi diri solenoida 139
induktansi silang 140, 141, 165, 166
induktor 132, 137, 136, 138, 139, 140, 141, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 161, 162, 164, 165, 166, 173, 174
infrasonik 50, 51, 54, 70
intensitas 43, 45, 46, 47, 51, 67, 68, 69, 70, 71, 73, 74, 176, 177, 178, 179, 180, 182, 183, 184, 192, 193, 194, 195, 196, 210, 221, 266, 272, 288
interferensi destruktif 23, 26, 34, 46, 57
interferensi konstruktif 23, 26, 33, 46
interferensi maksimum 33, 35, 36, 37, 39, 42, 47, 46, 58, 72, 190
interferensi minimum 34, 35, 36, 37, 38, 39, 46, 174
isolator 80, 92, 95, 99, 100, 270
isotop 258, 260, 261, 262, 263, 273, 274, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 287, 289

J

James Clerk Maxwell 167, 237
jarak antara bidang 190, 191
jari-jari Bohr 208, 209
joule 89, 102, 103, 172, 185, 186, 192, 194, 195, 208, 246, 247, 262, 270, 288

K

kaidah Hund 218
kaidah tangan kanan 108, 113, 115, 118, 119, 120, 124, 135, 136, 200
kapasitansi 93, 94, 100, 104, 164
kapasitas kapasitor 92, 93, 95, 97, 99, 100, 155, 160, 161
kapasitor 75, 76, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 103, 104, 132, 155, 156, 157, 159, 160, 161, 162, 164, 165, 166, 171, 172, 174
kapasitor elektrolit 93, 99
kapasitor keping sejajar 93, 94, 95, 99
kapasitor kertas 93, 99
kapasitor seri 97
kapasitor variabel 93, 99, 171
katode 91, 99, 183, 199, 200, 201, 204, 224, 270, 271
kecepatan sudut getar 14
keping sejajar 75, 85, 90, 91, 93, 94, 95, 98, 99, 102
kerangka acuan 230, 231, 232, 235, 236, 237, 238, 240, 241, 242, 254
kesetaraan massa energi 252
kisi difraksi 38, 39, 41, 43, 46
komutator 120, 142, 147
kondensator 92, 99, 162, 279, 280
konduktor 85, 86, 92, 96, 100, 101, 134, 145, 218, 271
konstanta Coulomb 87, 100
konstanta dielektrik 94, 77, 103
konstanta Laplace 52, 53
konstanta Planck 181, 185, 194, 195, 196, 208, 288
kontraksi Lorentz 252
kuat bunyi 53, 54, 55, 70, 71
kumparan primer 140, 141, 143, 144, 145, 147, 168
kumparan sekunder 140, 141, 143, 144, 147, 165, 167, 168, 173

L

laju energi gelombang 7
larutan optik aktif 44, 45

M

massa diam 187, 189, 244, 245, 248, 249, 250, 252, 254, 255, 289
massa elektron 82, 103, 104, 189, 194, 195, 196, 224, 252, 258, 262, 289
massa relativistik 244, 245, 252, 253, 289
medan listrik 75, 76, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 94, 95, 100, 101, 102, 104, 116, 128, 129, 133, 171, 172, 184, 190, 196, 200, 202
medan magnetik 105, 106, 107, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 120, 121, 122, 123, 124, 126, 128, 129, 130,

132, 133, 134, 135, 139, 141, 142, 145, 165, 167, 173, 174, 213, 215, 216, 275
metode 82, 140, 152, 216, 235
model atom Bohr 206, 208, 209, 211, 224, 226, 258, 288
model atom Dalton 198, 209, 224
model atom Demokritus 198, 209, 224
model atom Rutherford 203, 204, 209, 210, 224, 226, 228
model atom Thomson 199, 201, 209, 224, 226
modulus Bulk 52, 53, 70, 72
modulus Young 52, 53, 70, 74
momentum relativistik 187, 244, 247, 248, 249, 252
momentum relativitas 252
muatan listrik 75, 76, 77, 78, 81, 84, 86, 88, 89, 91, 97, 100, 101, 104, 115, 116, 129, 151, 204, 207, 226, 263

N

nada 50, 51, 53, 54, 55, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 66, 70, 73, 74, 172
neutron 76, 79, 100, 223, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 265, 269, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 280, 281, 282, 283, 285, 286, 289
Niels Bohr 206, 207, 225
nomor atom 218, 219, 222, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 272, 273, 283, 285, 286, 290
nomor massa 258, 259, 260, 261, 262, 263, 265, 272, 273, 276, 282, 283
nuklida 260, 262, 263, 265, 276, 281, 283, 289

O

orbit stasioner 206, 207, 209
osiloskop 147, 149, 152, 163

P

panjang gelombang de Broglie 188, 189, 191, 192, 193, 194, 195, 196
pelayangan bunyi 50, 51, 57, 73, 172
peluruhan 258, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 274, 284, 285, 286, 290
periode gelombang 7
permeabilitas 122, 123, 173
permukaan Gauss 85, 86
perut gelombang 11, 12, 14, 17, 27, 30, 60, 62
pipa organa 49, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 66, 67, 70, 71, 73, 74
polarimeter 44, 45
polarisasi 22, 26, 27, 29, 31, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 55, 56, 70, 171, 183
polarisator 42, 43, 44, 45, 46
postulat Bohr 207
postulat Einstein 254
potensial listrik 75, 76, 87, 88, 89, 91, 92, 93, 96, 98, 100, 101, 104, 189, 200, 204
prinsip ketidakpastian Heisenberg 191
prinsip Pauli 218
proton 76, 79, 80, 89, 90, 91, 100, 102, 103, 118, 192, 203, 222, 226, 247, 256, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 265, 269, 272, 273, 275, 276, 282, 283, 285, 286, 289

R

radiasi benda hitam 175, 176, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 193, 290
radiasi termal 176, 177, 179, 180, 183, 192
radioaktivitas 202, 257, 264, 268, 271, 284, 287
rangkaian arus bolak-balik 151, 153, 154, 155, 156, 159, 161, 162, 163, 165
rapat massa linear 5, 7
reaksi berantai 273, 274, 277, 283, 284
reaksi eksotermik 273
reaksi endotermik 273
reaksi fisi 249, 250, 252, 258, 273, 274, 276, 278, 279, 280, 283, 284, 286
reaksi fusi 182, 250, 252, 258, 273, 275, 276, 283, 284, 286
reaktor daya 279, 281, 287
reaktor nuklir 257, 274, 277, 278, 279, 280, 281, 283, 284, 286, 287
reaktor penelitian 279, 281, 286
reaktor produksi isotop 279, 281
refleksi 19, 26, 27, 29, 46, 55, 56, 70, 71, 101, 125, 167, 183, 192, 224, 252, 284
refraksi 20, 21, 26, 29, 47, 50, 55, 56, 70, 183
relativitas khusus 229, 235, 238, 240, 245, 246, 249, 252
resonansi 50, 54, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 70, 71, 73, 74, 157, 158, 162, 163, 164, 165, 166, 172
ruang vakum 21, 51, 96, 103, 183, 275

S

sacharimeter 45
simpul 4, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 27, 28, 62, 63, 64, 73, 148
simpul gelombang 11, 13, 14, 62, 64, 148
sinar monokromatik 32, 33, 37, 40, 42, 47, 171
sinar-X 186, 187, 188, 190, 192, 194, 201, 202, 264, 281, 288, 290
sistem BWR 279, 280, 281
sistem PWR 279, 281, 283
solenoida 112, 113, 122, 123, 124, 125, 127, 128, 130, 138, 139, 141, 165, 173, 174
sonar 54, 55, 72, 172
spektrum 35, 40, 41, 47, 48, 171, 174, 204, 205, 210, 213, 216, 220, 221, 222, 224, 227, 228, 289
spektrum emisi 220, 221, 222, 224
step-down 143, 144, 147, 168
step-up 142, 143, 144, 146, 147
sudut datang 19, 21, 26, 29, 35, 43, 55, 56
sudut fase 9, 10, 11, 13, 14, 18, 39, 152, 154, 158, 160, 161, 162, 163, 164, 174
sudut pantul 19, 26, 56, 190
sudut polarisasi/sudut Brewster 45
sudut simpang (deviasi) 38, 43
superposisi 11, 16, 17, 18, 27, 29, 50, 56, 57, 70

T

tangki riak 19, 20, 23, 26
tegangan bolak-balik 150, 152, 153, 156, 158, 159, 160, 163, 164, 168
tegangan efektif 147, 150, 151, 163
teori atom Bohr 208, 210, 211
tetes minyak Millikan 201, 209
tinggi nada 53, 54, 55, 60
toroida 113, 124, 125, 127, 130, 137, 139, 165, 173
transformasi Galileo 230, 231, 235, 236, 238, 252
transformasi kecepatan 238, 239, 252
transformasi Lorentz 236, 237, 238, 239, 241, 252
transformator 94, 132, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 168, 173, 280

U

ultrasonik 49, 50, 54, 70
ultrasonografi 54

V

volt 89, 91, 93, 95, 98, 99, 100, 103, 104, 149, 150, 167, 172, 178, 189, 190, 194, 196, 271
voltmeter 120, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 163, 164

W

waktu paruh 267, 268, 269, 271, 272, 281, 284, 285, 286

Daftar Pustaka

Allonso, M. dan Finn. 1980. *Fundamental Physics*, *Vol 1and 2*. New York: Addision-Wesley Publishing Company Inc.

Beiser, Arthur. 1983. *Konsep Fisika Modern, Edisi Ketiga*. Jakarta Pusat: Erlangga.

Biryam, M. 1992. *Hukum-Hukum Kekekalan dalam Mekanik*a. Jakarta: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.

Bueche, Fredrick. 1982. *Introduction to Physics for Scientist and Insights*. New York: Grow Hill Book Company Inc.

Dorling Kindsley. 1995. *Jendela IPTEK*, *seri 1–4*. Jakarta: Balai Pustaka.

Giancoli, Douglas C. 2000. *Physics*, *3th Edition*. USA: PrenticeHall International.

Grolier International Inc. 1995. *Oxford Ensiklopedi Pelajar*. Jakarta: Widyadara.

Haliday, D, R. Resnick, J. Waker. 2001. *Fundamental of Physics Sixth Edition*. USA: John Willey and Sons Inc.

Harsanto. 1980. *Motor Bakar*. Jakarta: Djambatan.

Hermawan Edi. 2004. *Radar Atmosfer Khatulistiwa*. Surakarta: Pabelan.

Hewwit, Paul G. 1993. *Conceptual Physics, 6th Edition*. USA: Harper Collins College Publisher.

Hewwit, Paul G. 1998. *Conceptual Physics, 8th Edition*. USA: Addison-Wesley Publishing Company Inc.

Jones, Edwin R. dan Richard L. Childers. 1993. *Contemporary College Physics*. USA: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

Sears, F.W. et.al. 1993. *University Physics*. USA: Addison-Wesley Publishing Company Inc.

Tipler, Paul. 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik*, *Jilid 1* (alih bahasa: Prasetyo dan Rahmad W. Adi). Jakarta: Erlangga.

Tipler, Paul. 2001. *Fisika untuk Sains dan Teknik*, *Jilid 2* (alih bahasa: Bambang Soegijono). Jakarta: Erlangga.

Warlijo, Liek. 2003. *Kamus Fisika*, *Cetakan Kedua*. Jakarta: Balai Pustaka.

Diunduh dari BSE.Mahoni.com

ISBN 978-979-068-816-2 (No. Jilid lengkap)
ISBN 978-979-068-931-2

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 22 tahun 2007 tanggal 25 Juni 2007 Tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran Yang Memenuhi Syarat Kelayakan Untuk Digunakan Dalam Proses Pembelajaran.

Harga Eceran Tertinggi (HET) Rp.19.502,-